



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

**Proyecto básico de adaptación de
eco tecnologías para la gestión de
efluentes del proceso industrial del
café en el Departamento del Cauca,
Colombia.**

Treball realitzat per:
Pablo Sepulcre Luna

Dirigit per:
Jordi Morató
Jaume Puigagut

Grau en:
Enginyeria d'Obres Públiques

Barcelona, 09/06/2019

Departament d'enginyeria Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

Agradecimientos

En primer lugar a Jordi Mórato por darme la oportunidad de formar parte de este proyecto.

A mis padres a mi hermana, a mi abuela y a mi familia por el apoyo incondicional durante todos estos años, dándome consejos, collejas y croquetas cuando ha sido necesario.

A mis compañeros de clase, en especial a Ada, Alba, Laia, Oscar y Diego por hacer más amenas las horas de estudio y los madrugones, por las escapadas después de exámenes, por Glasgow y por Torre.

Y a Carlos Sierra, por la motivación que me dio para empezar esta carrera.

Por último, dedicar tanto este trabajo como el grado, a mi yayo Antonio. Por creer en mí siempre, y aun y no estando del todo ser el pilar sobre el que me apoyo cuando algo se cae. Aquí tienes el proyecto que te faltó.

Tabla de contenido

Índice de Imágenes	6
Índice de Tablas	7
Listado de acrónimos.....	8
Glosario	9
1. Introducción	10
1.1 Objetivo	11
1.2 Alcance.	11
1.3 Especificaciones básicas.	12
1.4 Justificación de la utilidad el TFG.	12
2. Proyecto LIFE+REAGRITECH.....	13
3. Parámetros presentes en las aguas residuales y metodología seguida para su cuantificación.....	15
4. Sistema productivo del café.....	17
4.1 Métodos de producción del café.....	17
4.2. Método de producción en seco	17
4.3 Método de producción húmedo.	18
4.3 Método de producción ecológico.....	19
5. Caso de estudio.....	20
5.1 Emplazamiento:	20
5.2 SUPRACAFE Colombia S.A y TECNICAFFE	21
5.3 Condiciones climáticas.....	22
5.4 Beneficiado del café en las instalaciones:	23
5.5 Consumo de agua	24
5.6 Propiedades físico-químicas de las aguas residuales	24
5.7 Meta de tratamiento para vertido de aguas residuales.....	25
6. Opciones para el tratamiento de aguas residuales del lavado del café.	25
6.1 Condicionantes:	25
7. Alternativas.....	27
7.1 Filtro de arena	27
7.2 Tanque imhoff.....	35
7.3 Filtro de arena + tanque imhoff.....	38
7.4 Biodigestor	40
7.5 Filtro de arena + biodigestor	44
7.6 Biorreactor de Membrana.....	46

7.7 Floculación-decantación tradicional.....	49
8. Marco resumen comparativo de las alternativas.	52
9. Análisis de alternativas.	52
9.1 Espacio requerido:.....	52
9.2 Coste de construcción:.....	52
9.3 Coste de explotación:.....	53
9.4 Rendimiento:.....	53
9.5 Adaptabilidad:.....	53
9.6 Criterio de puntuación:	54
10. Puntuación de las alternativas.....	55
10.1 Alternativa 1: Filtración.	55
10.2 Alternativa 2: Tanque imhoff.....	56
10.3 Alternativa 3: Filtración + Tanque imhoff	57
10.4 Alternativa 4: Biodigestor.	58
10.5 Alternativa 5: Filtrado + Biodigestor.	59
10.6 Alternativa 6: MBR.	61
10.7 Alternativa 7: Floculación- decantación	62
10.8 Presentación de resultados:	63
10.8.1 Elección de la alternativa:	64
11. Diseño y dimensionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales ..	64
11.1 Diseño y dimensionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales en fase de prototipo.....	65
11.1.1 Dimensionamiento del sistema de filtrado:.....	66
11.1.2 Dimensionamiento y definición del Biodigestor:	72
11.1.3 Dimensionamiento de las conducciones de entrada y salida:	73
11.2 Dimensionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales a capacidad completa.	75
11.2.1 Dimensionamiento del sistema de filtrado:.....	76
11.2.2 Dimensionamiento de las conducciones:	79
11.2.3 Dimensionamiento y definición del Biodigestor.....	81
Conclusiones:	82
Biografía	83

Índice de Imágenes

Imagen 1 Prototipo LIFE+REAGRITECH	13
Imagen 2 Sistemas de control del prototipo LIFE+REAGRITECH	14
Imagen 3 Situación del departamento del Cauca en Colombia	20
Imagen 4 Municipio de Cajibío.....	21
Imagen 5 Vista general de la entrada del parque TECNICAFE	22
Imagen 6 Esquema del tratamiento.....	23
Imagen 7 Distribución de espacios de la zona 1 para la instalación del sistema de tratamiento de humedales	26
Imagen 8 Distribución de espacios de la zona 2 para la instalación del sistema de tratamiento de humedales	26
Imagen 9 Evolución de la pérdida de carga para un filtro lento a lo largo del tiempo	28
Imagen 10 Esquema de los elementos que conforman un filtro.....	29
Imagen 11 Esquema de la ubicación de los filtros	30
Imagen 12 Pre dimensionamiento del filtro (perfil) unidades en m.....	30
Imagen 13 Pre dimensionamiento del filtro (planta) unidades en m.....	30
Imagen 14 Evolución de la pérdida de carga en el filtro a lo largo del tiempo	31
Imagen 15 Funcionamiento básico de un filtro rápido y de su proceso de limpieza	32
Imagen 16 Esquema del sistema global, Alternativa 1 + Prototipo	33
Imagen 17 Elementos de un tanque Imhoff	35
Imagen 18 Esquema global Alternativa 2 + Prototipo	37
Imagen 19 Esquema global Alternativa 3 + Prototipo	39
Imagen 20 Rendimiento de un biodigestor en función de la temperatura	41
Imagen 21 Elementos de un biodigestor	42
Imagen 22 Medidas comerciales de un biodigestor	43
Imagen 23 Esquema global, Alternativa 5 + Prototipo	45
Imagen 24 MBR de membrana sumergida (Lopetegui, 2004)	47
Imagen 25 MBR membrana externa (Lopetegui, 2004)	48
Imagen 26 Decantador primario	50
Imagen 27 Filtro (unidades en cm)	68
Imagen 28 Esquema de funcionamiento del filtro	70
Imagen 29 Contenedor del material filtrante	71
Imagen 30 Biodigestor comercial Rotoplas (600l)	72
Imagen 31 Tubería PVC flexible.....	74

Imagen 32 Dimensionamiento del filtro (unidades en cm)	78
Imagen 33 Biodigestor Rotoplas (7000L)	81
Imagen 34 Dimensiones del Biodigestor Rotoplas (7000L)	81

Índice de Tablas

Tabla 1 Propiedades de las aguasmieles.....	24
Tabla 2 Propiedades de las aguas residuales del lavado del café	24
Tabla 3 Limites de carga.....	25
Tabla 4 Comparacion entre metodologias de filtrado	32
Tabla 5 Dimensiones recomendadas en la construcción de un tanque imhoff	36
Tabla 6 Comparativa entre Biodigestor de hormigón y Biodigestor de plástico	41
Tabla 7 Parámetros típicos de diseño.....	50
Tabla 8 Esquema global, Alternativa 7 + Prototipo.....	51
Tabla 9 Comparativa de alternativas.....	52
Tabla 10 Puntuacion de alternativas	63
Tabla 11 Parámetros Básicos del agua residual del lavado del café.....	65
Tabla 12 Dimensiones Biodigestor Rotoplas (600l).....	73
Tabla 13 Dimensiones tubería PVC flexible	74
Tabla 14 Características de la conducción (Prototipo)	74
Tabla 15 Características de as aguas residuales del lavado del café	76
Tabla 16 Parámetros de la conducción.....	80
Tabla 17 Especificaciones de la conducción.....	80

Listado de acrónimos

CENICAFE-Centro Nacional de Investigación del Café

Cps- Café pergamino seco

DBO- Demanda Biológica de Oxígeno

DQO- Demanda Química de Oxígeno

I+D+i- Investigación, desarrollo e innovación

pH- Potencial de Hidrógeno

SST- Sólidos Suspendidos Totales

MES- Materia en Suspensión

CHS- Carga Hidráulica Superficial

UNT- Unidades de Turbidez

MBR- Bioreactor de Membrana

EDAR- Estación Depuradora de Aguas Residuales

CAC- Carbón Activo

FAS- Sulfato Ferroso Amónico

OD- Oxígeno disuelto

ODi- Oxígeno disuelto inicial

ODr- Oxígeno disuelto residual

Glosario

Aguas mieles: Aguas residuales producidas en la fase de lavado y despulpado de los granos de café. Sus características físico-químicas se derivan de la pulpa y el mucilago debido a los procesos de fermentación que tienen lugar durante el proceso.

Beneficio del café: Se entiende por beneficio del café, el conjunto de operaciones necesarias para convertir el fruto del café en café pergamino de calidad listo para su comercialización. Las etapas del beneficiado son: Despulpado, remociones mucilago, lavado, clasificación y secado (CENICAFE, 2016).

Café cereza: Fruto fresco en el momento de la cosecha.

Café pergamino seco: Estado del café en el momento de su comercialización. (CENICAFE, 2016).

Cepa o semilla: Cultivo heterogéneo de microorganismos aerobios que transforman la materia orgánica en CO₂ y H₂O (CENICAFE, 2016).

DBO₅: Medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de materia orgánica biodegradable, en condiciones aeróbicas, para un periodo de 5 días a una temperatura de 20°C. Se expresa en mg O₂/l. (IDEAM, 2007a).

DQO: Medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidar materia orgánica en el agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo. Se expresa en mg O₂/l. (IDEAM, 2007b).

Mucilago: Sustancia de origen vegetal, viscosa e hidroscolia, con alto contenido de carga orgánica. Queda adherida al grano de café después de la fase de despulpe. Es importante retirarlo y para ello se utiliza la fermentación. (Calix, 2001).

pH: Medida de concentración de iones de hidrógeno y de la naturaleza ácida o alcalina de la solución acuosa que puede afectar los usos específicos del agua. La mayoría de las aguas naturales tienen un pH que varía entre 6 y 8, mientras que las aguas residuales presentan pH variables. En concreto las aguas del café son ácidas, es decir, con pH alrededor de 3. (UNAM, 2013).

SST: Los sólidos suspendidos son partículas sólidas que son transportadas gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua (IDEAM, 2007c).

1. Introducción

Uno de los centros de investigación más importantes se encuentra en Colombia, se trata del parque tecnológico del café TECNICAFAE, en el cual la empresa SUPRACAFÉ S.A desarrolla su actividad de beneficiado del café. Actualmente las industrias de beneficiado de café vierten las aguas residuales generadas en sus tratamientos de forma directa al medio ambiente, o de forma prácticamente directa, generando un desequilibrio en las aguas de los cursos naturales que generan un impacto negativo en la flora y fauna de la zona, y por consiguiente en las actividades económicas que se pueden generar de forma indirecta.

La industria del café, es una de las más importantes a nivel mundial, y en Colombia se sitúa como una de las industrias más importantes del país. Este hecho se debe al gran volumen de exportación que genera esta industria a nivel mundial, convirtiendo Colombia en uno de los 5 productores de café más importantes a nivel global.

Es sencillo entender que dichas exportaciones seguirán aumentando a lo largo del tiempo, ya que la demanda de este producto es cada vez mayor a nivel global.

Dicho esto, se hace evidente la necesidad de realizar actuaciones útiles que minimicen los impactos de dicha industria, permitiendo un crecimiento de la misma de forma sostenible, reduciendo al mínimo los impactos negativos de la misma.

La optimización del sistema de beneficiado de café y la minimización de los impactos generados por el vertido de aguas en el medio, pasa de forma obligatoria por un estudio de todo el conjunto de acciones que se ven involucradas en el proceso. Es por esto que previo al diseño de un sistema de tratado de aguas residuales debemos conocer que procesos se llevan a cabo en la planta, permitiéndonos así, conocer las características del agua generada en los procesos.

En la actualidad, existen varios sistemas para el beneficiado del café, aunque básicamente se utilizan dos, el método seco y el método húmedo. Se está empezando a producir siguiendo un tercer sistema, llamado sistema ecológico, mediante el cual la necesidad de agua en el proceso se ha reducido de forma drástica.

Este proyecto se engloba dentro del proyecto AQUARISC, en el que se ha desarrollado el sistema de tratamiento de aguas LIFE+REAGRITTECH. Este sistema se encuentra en fase prototipo, y se espera poder ser trasladado pronto a las instalaciones de TECNICAFAE.

Sin embargo la instalación requiere de una fase de tratamiento previa, para poder garantizar el buen funcionamiento del sistema, es por eso que se va a realizar el estudio y diseño de esta primera fase, tanto para la adaptación del prototipo actual como para una futura adaptación que permita tratar el volumen total de las aguas residuales producidas en el lavado del café.

1.1 Objetivo

Realizar un proyecto básico de planta piloto demostrativa y adaptación de la planta piloto a escala, para el tratamiento de efluentes de la agroindustria del café en el Departamento del Cauca (Colombia) mediante el uso de eco tecnologías.

Objetivos específicos

OE1. Adaptar la planta piloto de tratamiento del proyecto LIFE REAGRITECH al tratamiento de efluentes en el proceso de lavado del café, en las instalaciones de TECNICAFE. Diseño del sistema primario y del pretratamiento y adaptación del piloto REAGRITECH como sistema secundario i/o terciario.

OE2. Realizar un análisis de alternativas comparativo entre las posibilidades como solución al tratamiento de efluentes generados en la planta de beneficiado del café

OE3. Adaptar el diseño del sistema primario de tratamiento de efluentes en el proceso de lavado del café a los volúmenes de tratamiento reales.

1.2 Alcance.

A lo largo del trabajo se desarrollaran las siguientes tareas:

- Descripción del proyecto REAGRITECH.
- Planteamiento y análisis de alternativas para el tratamiento primario del efluente del lavado del café.
- Puntuación de las alternativas y elección de la más conveniente.
- Dimensionamiento del sistema primario para la fase prototipo, así como una valoración económica.
- Dimensionamiento del sistema primario para el tratamiento del total de las aguas residuales producidas en el lavado del café, así como una valoración económica.

Las tareas que **no** se van a desarrollar son:

- Estudio geotécnico de la zona de instalación.
- Dimensionamiento y valoración económica del sistema de extracción de gases del biodigestor.
- Seguimiento de la instalación del sistema.
- Análisis del funcionamiento del sistema en fase prototipo

1.3 Especificaciones básicas.

En el desarrollo de este proyecto se han tenido en cuenta una serie de consideraciones generales:

- El sistema se implantará en las instalaciones de TECNICAFE.
- En la fase de funcionamiento del prototipo el caudal mínimo será de 150l/d.

Consideraciones generales:

- Los costes económicos deben ser bajos.
- Los requerimientos de espacio deben ser bajos.
- El material y el funcionamiento del sistema debe ser sencillo y de fácil manipulación.

1.4 Justificación de la utilidad del TFG.

El desarrollo de este trabajo permitirá realizar la adaptación del prototipo LIFE+REAGRITECH en las instalaciones de la planta de TECNICAFE, de igual forma se establecen las dimensiones necesarias que deberá tener el sistema de tratamiento de aguas cuando trabaje a volumen completo.

De esta forma se pretende diseñar un sistema compacto, sencillo y económico que se presente como una alternativa sólida al tratamiento de aguas residuales en las diferentes plantas de la zona. Reduciendo así la contaminación generada actualmente por la industria del café en Colombia.

2. Proyecto LIFE+REAGRITECH

Este proyecto se engloba dentro del proyecto LIFE+REAGRITECH (Regeneración y reusó de agua de escorrentía y de drenaje en terreno agrícola a partir de sistemas naturales combinados de tratamiento de aguas), el objetivo principal de este es reducir el impacto producido por el vertido de aguas contaminadas al medio. El sistema busca eliminar los nitratos y sulfatos que tienen las aguas de origen agrícola y que, actualmente, se vierten directamente en el medio. Contaminando acuíferos y zonas vegetales.

Actualmente, el proyecto cuenta con tres plantas piloto en la zona hortofrutícola de la Plana de Lleida, en los municipios de Belvis, Sudanell y Vilanova de la Barca.



Imagen 1 Prototipo LIFE+REAGRITECH

En estas plantas piloto, encontramos dos contenedores de transporte marítimo, en el interior de uno de ellos se han dispuesto una serie de capas de grava, arena y vegetación (*Phragmites australis*) (AQUARISC.1) con las que se imita un humedal construido, filtrando el agua y absorbiendo los contaminantes en el proceso.

En el contenedor contiguo encontramos todos los aparatos de control necesarios para una correcta explotación y monitorización del sistema. En este segundo contenedor también se encuentra el sistema de alarma para evitar robos o desperfectos, y un sedimentador para reducir la entrada de materia en suspensión en el prototipo.



Imagen 2 Sistemas de control del prototipo LIFE+REAGRITECH

El control del sistema se registra en una plantilla formato Excel, en la que se registran las operaciones principales del funcionamiento del humedal.

Este sistema se ha probado durante un periodo de dos años.

El proyecto REAGRITECH, nace en el Instituto Politécnico Campus Terrasa (IPCT), donde se encuentran unas plantas piloto a escala utilizadas en las pruebas de la fase inicial del proyecto.

3. Parámetros presentes en las aguas residuales y metodología seguida para su cuantificación

En este apartado se explica que son cada uno de los parámetros que encontramos en las aguas residuales, y que buscamos eliminar o reducir. Y se muestra el proceso mediante el cual estos parámetros se cuantifican.

- **MES:** Se define como MES, la cantidad de materia en suspensión que encontramos en el agua. Para su cuantificación se debe realizar un filtrado de la muestra de agua por un filtro estándar cuyos poros sean de 0.7µm.

Posteriormente se seca el filtro para eliminar el agua, y se pesa. La diferencia de pesos entre el filtro sin utilizar y el filtro una vez realizado el filtrado y secado es la cantidad de MES que encontramos en el agua.

Se mide en mg/l

- **SST:** Se trata de la cantidad de sólidos en suspensión totales que encontramos en el agua. En este parámetro se incluyen la MO (materia orgánica) y la MI (materia inorgánica) que contiene el agua.

Se mide en mg/l

- **Turbidez:** La turbidez es una propiedad óptica del agua que se manifiesta gracias a la dispersión de los rayos de luz producida por la presencia de MES. En este caso, la turbidez es una medida indirecta de la cantidad de MES que encontramos en la muestra.

La medición de la turbidez de una muestra de agua se realiza con un turbidímetro y sus unidades de medida son las UNT o UT.

- **DBO₅:** Este parámetro es una medida indirecta de la MO biodegradable que encontramos en el agua. Se trata de la demanda bioquímica de oxígeno.

Su cuantificación está relacionada con la cantidad de oxígeno consumido por un cultivo de microorganismos heterótrofos y aerobios que crece sin limitación nutricional, degradando así la MO de la muestra y transformándola en productos inorgánicos sencillos.

Se mide en mg O₂/l

La ecuación utilizada para su cuantificación es:

$$DBO_5 = \frac{OD_{consumido} - OD_{consumo\ cepa}}{V_m} * V$$

Dónde:

V= Volumen total

V_m= Volumen de la muestra

OD consumido= ODi – Odr

ODi: Oxígeno disuelto inicial

ODr: Oxígeno disuelto residual

OD consumo cepa= ODi (agua de dilución + cepa) – ODr (agua de dilución + cepa)

- **DQO:** La Demanda Química de Oxígeno es un parámetro utilizado en la medición de sustancias oxidables (básicamente materia orgánica) por medios químicos que se encuentran en la muestra de agua. Su unidad de medida, igual que para la DBO es mgO₂/l.

La cuantificación de la DQO se realiza mediante la siguiente expresión:

$$DQO = \frac{8000 * N * (V_1 - V_2)}{V_m}$$

Dónde:

N: Concentración de la solución de FAS (Sulfato Ferroso Amoniacal)

V1: Volumen de FAS total

V2: Volumen de FAS utilizado para la muestra

Vm: Volumen de la muestra

- **pH:** El pH (Potencial de Hidrogeno) mide la acidez o alcalinidad de la muestra de agua analizada. Este parámetro será clave en el diseño del tratamiento, ya que su valor puede afectar a los rendimientos de eliminación que tienen algunos sistemas.

Su cuantificación se realiza siguiendo la expresión:

$$pH = -\log[H^+]$$

Dónde:

H⁺: Concentración de hidrogeno en el agua.

4. Sistema productivo del café.

4.1 Métodos de producción del café

Actualmente existen varios métodos de producción de café, todos ellos tienen una serie de puntos fuertes e inconvenientes a estudiar cuando se pretende decidir que método utilizar en una planta de beneficiado. Se hace fundamental la necesidad de entender que etapas conforman los procesos y cuáles son las características y requerimientos de los mismos.

A continuación se explican los dos métodos más utilizados en la actualidad, el método de producción en seco y el método de producción en húmedo, este último es el que se utiliza en la planta de SUPRACAFE y por tanto es en el que interesa realizar un especial hincapié en aquellas etapas que produzcan aguas residuales.

Buscando así, comprender las necesidades a las que deberá hacer frente la línea de tratamiento de aguas residuales que se pretende diseñar en este trabajo, o si bien existe la posibilidad de optimizar este método, disminuyendo así el consumo de agua necesario en el mismo.

4.2. Método de producción en seco

El método de producción en seco del café es el resultado de un proceso de tratamiento de la cereza formado por 4 etapas fundamentalmente. Este sistema de beneficiado es el más antiguo de los que se utilizan es por eso que se encuentra en zonas en las que la producción del café se lleva a cabo de forma extensiva, o zonas subdesarrolladas ya que tanto los requerimientos de agua como las exigencias en infraestructuras son inferiores a los otros métodos de producción, por otro lado, se debe tener en cuenta que la mano de obra necesaria en esta alternativa es mayor que en las otras.

Como resultado a la producción en seco se obtiene un grano de café con una calidad claramente inferior frente a los otros métodos existentes.

El proceso empieza como en todos los casos con la recolecta de la cereza de café, y el transporte a planta. Una vez se recibe en la planta de beneficiado, las cerezas se clasifican según su estado, desechando aquellas que han sido picadas por algún insecto o las que no se encuentran en un punto de maduración adecuado. Esta selección se puede llevar a cabo de forma manual o utilizando canales de agua, en los cuales las cerezas más maduras decantan al tener una densidad mayor.

Una vez seleccionadas aquellas cerezas consideradas aptas, se extienden en esterillas o camas elevadas (camas africanas), sin quitar la piel, durante una media de unos 20 días, pudiendo, en función de las condiciones ambientales, prolongarse

hasta los 40 días. Durante el secado, se les debe ir dando la vuelta, permitiendo así un secado homogéneo de la cereza, se hace evidente la necesidad de controlar esta etapa, ya que de ella dependerá en gran parte el resultado final. En el caso de un secado excesivo, se corre el riesgo de que los granos se agrieten o se quiebren al no tener un contenido de humedad adecuado, y esto los clasificaría como defectuosos.

En el caso de un secado insuficiente, se corre el riesgo de que se generen hongos en el grano, impidiendo su comercialización y por lo tanto provocando el rechazo del lote y la pérdida económica que ello conlleva.

Una vez realizado el secado, se procede con el despulpado de la cereza, en la que se retiran la piel o cascara y la pulpa que envuelve al grano de café. Este proceso se realiza de forma mecánica.

Una vez se tiene el grano secado y despulpado se procede a la clasificación de los mismos, volviendo así a poder desechar aquellos que no se consideren aptos para la comercialización.

Por último se lleva a cabo el tostado del grano, y el empaque para su comercialización.

Como se ha dicho anteriormente, este proceso tiene como resultado un café con una calidad inferior al que se obtiene mediante los métodos húmedo o ecológico.

Se debe tener en cuenta, que la producción de café mediante este método solo es recomendable si nos encontramos en un clima cálido y con unos valores humedad pequeños, ya que es en ese ambiente en el que esta alternativa supera en rendimiento y costes al resto, haciéndolo idóneo para la producción de café en Etiopía, Yemen o Brasil.

4.3 Método de producción húmedo.

Este sistema se presenta como una alternativa al beneficiado en seco del café, como ventaja frente a la alternativa en seco, cabe destacar que la calidad del café obtenido mediante este proceso es claramente superior. Es por eso que son muchos los productores que optan por este tipo de producción en sus plantas.

Por el contrario, debemos tener en cuenta que los requerimientos, tanto de maquinaria como de agua, son superiores.

Este método de producción se diferencia básicamente en un punto del tratamiento, y es que mediante el método de producción húmedo se lleva a cabo el desmucilaginado del café mediante un proceso de fermentación.

Las etapas que conforman este tratamiento son 5 fundamentalmente, el proceso da inicio como en el resto de alternativas con la recolecta de las cerezas y su transporte a planta.

Una vez se reciben en planta, se realiza una clasificación desechando aquellos granos no óptimos (de igual forma que en el caso anterior). Una vez seleccionados aquellas cerezas consideradas óptimas no se lleva a cabo el secado (como en el caso anterior) sino que se lleva a cabo un despulpado de la cereza, en el que se le quita la piel y la pulpa que recubre la capa más exterior del grano.

A continuación se realiza el desmucilaginado mediante fermentación, es en este punto del proceso en el que se generan las denominadas aguasmieles. CENICAFE. (2011^a) Estas aguas residuales, se caracterizan por no poder recircularse y por tener una carga orgánica muy elevada, esto provoca que el vertido de dichas aguas residuales al medio natural provoque un efecto no deseado.

Posteriormente se procede con el lavado de los granos con agua, y el secado de los mismos hasta alcanzar una humedad aproximada del 12%.

Una vez se tienen los granos secados se realiza como en el caso anterior el tostado del mismo, dejándolo listo para su empaque y distribución posteriormente.

La diferencia entre ambos métodos, radica, como se ha explicado en el proceso de desmucilaginado del grano de café. Esta etapa requiere un consumo de agua elevado, y como es de esperar, esto hace que este método produzca un volumen de aguas residuales mayor que el sistema en seco.

Este sistema, es el que se utiliza actualmente en las instalaciones de SUPRACAFE, debida a la mayor calidad del producto.

Actualmente, la industria cafetera es uno de los pilares económicos de Colombia, siendo uno de los países con mayor producción de café.

Es de esta situación de donde nace la necesidad de disminuir el impacto ambiental que esta industria está provocando en el medio ambiente, al verter las aguas residuales generadas en el proceso a los cauces naturales.

4.3 Método de producción ecológico

En las instalaciones de CENICAFE se ha desarrollado la tecnología BECOLSUB, con ella se permite producir un café de mayor calidad que en los casos anteriores, con este sistema también se consigue una disminución en el consumo de agua y en las cargas contaminantes que estas tienen.

En este caso, el consumo de agua se ha reducido hasta un 90% en algunos casos y la carga contaminante de las mismas se ha reducido hasta en un 72%. CENICAFE. (2011b).

5. Caso de estudio

5.1 Emplazamiento:

Colombia es un país soberano situado en la región noroccidental de América del sur, la división interna se basa en un conjunto de 32 subregiones denominadas departamentos.

El parque tecnológico del café (TECNICAFE), que es el emplazamiento escogido para el desarrollo del proyecto se encuentra en el departamento del Cauca, ubicado entre las cordilleras occidental y central. Cauca cuenta con una superficie de 29.309km², lo que representa un 2,7% de la extensión total del país, situándolo como el duodécimo departamento de mayor extensión.



Imagen 3 Situación del departamento del Cauca en Colombia

El Cauca se divide, a su vez, en 42 municipios, entre los cuales encontramos Cajibío, lugar en el que se encuentran las instalaciones donde se lleva a cabo el proyecto.



Imagen 4 Municipio de Cajibío

El municipio de Cajibío se encuentra en la región alta de la cuenca hidrográfica del río que da nombre al departamento, el río Cauca y su elevación es de unos 1800m sobre el nivel del mar aproximadamente. Las coordenadas exactas en las que se encuentra el Parque Tecnológico del Café son: N:2°35'10.8"-O:76°33'04.8".

La actividad económica del país se basa, a nivel global, en el sector primario, dentro del cual destacan las actividades asociadas al cultivo del café, caña de azúcar, etc...

Debemos tener en cuenta, que dentro de los distintos cultivos, el cultivo y posterior producción y exportación del café son un pilar de la economía nacional, ya que dicha industria se sitúa como una de las 5 más importantes a nivel nacional.

La importancia de la industria del café y los efectos que esta produce en el medio ambiente fueron los elementos clave que impulsaron la creación de las instalaciones en las que hoy se investigan métodos de producción del café más sostenibles y en las cuales se quiere ubicar la línea piloto REAGRITTECH de tratamiento de aguas residuales.

5.2 SUPRACAFE Colombia S.A y TECNICAFAE

La empresa SUPRACAFE Colombia S.A es una compañía de capital español, se constituyó en el año 2008, y ha basado su funcionamiento y crecimiento en la aplicación de I+D+i en los procesos de producción teniendo como objetivo la producción de un café de alto valor añadido.

Las instalaciones de SUPRACAFE Colombia S.A, se encuentran en el municipio de Cajibío y cuentan con una extensión de 120 hectáreas en las que se produce el café, dentro de las instalaciones encontramos el Parque Tecnológico del Café (TECNICAFAE).



Imagen 5 Vista general de la entrada del parque TECNICAFE

Es en el Parque Tecnológico del Café donde actualmente se están desarrollando toda una serie de acciones con las que se pretende mejorar la situación del sector de producción de café, mediante una gestión abierta y colaborativa entre los diferentes actores que conforman la caficultura. Haciendo de esta industria una industria más competitiva y sostenible, adaptándola a las necesidades sociales y ambientales actuales y futuras.

En las instalaciones se reciben, durante la época de cosecha, unos 38.000kg/día de café cereza, y durante la época de no cosecha esta entrada se ve reducida a 13000kg/semana. Estos volúmenes de producción generan un total de 90.000 litros/año, de las denominadas aguasmieles, que actualmente se vierten al medio de una forma casi directa.

5.3 Condiciones climáticas

Aunque para todo proyecto se hace fundamental el conocimiento de las condiciones climáticas del emplazamiento, en este caso estas tienen una importancia mayor, debido a la vulnerabilidad que presentan los procesos biológicos que tienen lugar durante el tratamiento de las aguas residuales. De igual forma, el conocimiento de las condiciones medioambientales nos da una primera idea de porque se utiliza el método de producción húmedo en estas instalaciones.

La zona en la que se ubica el Parque Tecnológico del Café presenta un clima templado húmedo, en el las temperaturas anuales oscilan entre los 12 y 24°C. Según los registros la temperatura media en el parque es de unos 19°C.

Por lo que hace a la pluviometría de la zona, se ha registrado una media anual de 2.200mm, repartidos entre 150 y 200 días, IDEAM la época de mayor registro se encuentra en noviembre, llegando al mínimo en julio. Siguiendo la tendencia de la zona en la que se encuentra, se dan dos fenómenos medioambientales a los que

se les debe prestar atención. El Niño, periodo en el que abundan las precipitaciones y La Niña, época en la que la escasez de agua puede provocar sequias importantes.

5.4 Beneficiado del café en las instalaciones:

En las instalaciones de SUPRACAFE se realiza el beneficiado del café mediante el método húmedo.

La primera etapa del tratamiento es la recepción de la cereza del café, posteriormente se separa la cascarilla del grano. De esta forma el grano queda únicamente recubierto por el mucilago, que debe eliminarse.

Esta segunda etapas recibe el nombre de despulpado, para la eliminación del mucilago se introducen los granos en un tanque con agua dejándolos fermentar, es en este punto en el que se generan las llamadas aguasmieles.

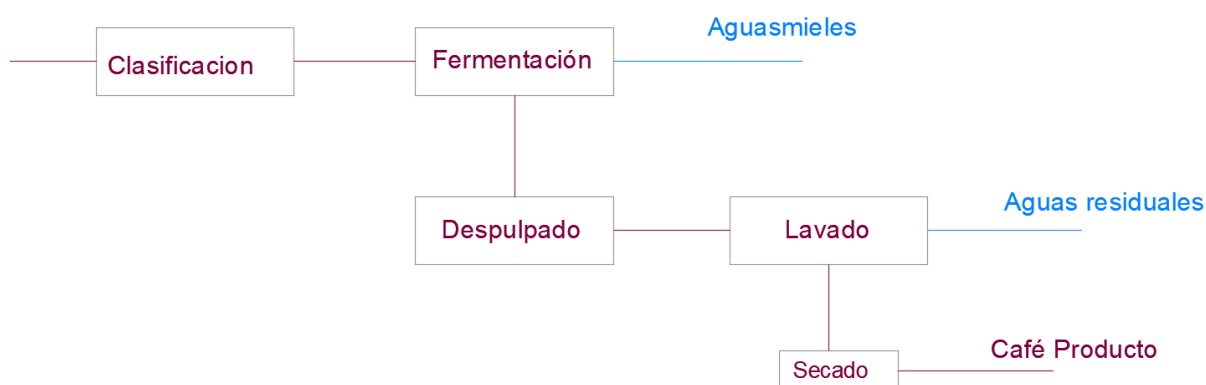


Imagen 6 Esquema del tratamiento

Una vez fermentado el mucilago, se separa del grano mediante maquinas despulpadoras

Actualmente estas aguas mieles se transportan a un sistema de filtrado que se encuentra dentro del parque.

La siguiente etapa en el beneficiado es un lavado de los granos con agua, el sistema que se pretende diseñar llevara a cabo **únicamente** el tratamiento de estas aguas residuales.

Por último, se realiza un secado de los granos y el empaque para su exportación y comercialización.

5.5 Consumo de agua

En la producción de café existe una variación de caudal de agua en función de la época del año. En las épocas de cosecha se consumen hasta 7000 l/día para toda la planta.

En la época de no cosecha se consumen unos 2000l/día, en este caso este volumen durante esta época del año (enero-marzo, julio-diciembre). AQUARISC

5.6 Propiedades físico-químicas de las aguas residuales

Como se ha explicado anteriormente, durante el proceso de beneficiado de café se producen dos tipos diferenciados de aguas residuales.

Las primeras son las llamadas aguasmieles, estas no se tratarán en este proyecto debido a que las cargas contaminantes que tienen son demasiado elevadas como para garantizar un buen tratamiento por parte del prototipo LIFE+REAGRITTECH.

Esto se da por su contacto directo durante los procesos de fermentación, en los que el pH del agua se ve alterado, llegando a valores de 3-4 (dándole unas propiedades de acidez)

En cuanto a los parámetros de DBO, DQO y SST de este afluente, según las muestras tomadas en las instalaciones son:

Aguasmieles		
Parámetros	Unidad	Máximo
DBO5	mg/l	15321
DQO	mg/l	36344
SST	mg/l	4561
pH		3,14
Temp	°C	18-20

Tabla 1 Propiedades de las aguasmieles

En cuanto a las aguas residuales producidas en la etapa de lavado de café, sus cargas contaminantes son inferiores que en el caso de las aguasmieles. Esto se da gracias a que no se encuentran en contacto con la pulpa durante los procesos de fermentación. Las características son:

Lavado del café		
Parámetros	Unidad	Máximo
DBO5	mg/l	12124
DQO	mg/l	25102
SST	mg/l	1133
pH		3,34
Temp	°C	18

Tabla 2 Propiedades de las aguas residuales del lavado del café

5.7 Meta de tratamiento para vertido de aguas residuales

Los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites permisibles según la resolución 0631 de 2015, en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas ARND a cuerpos de agua superficiales de las actividades de agroindustria y ganadería

Parámetro	Unidades	Límite Max de Concentración de Carga Contaminante en Agua Residual (mg/L)
pH	mg/L	5.00 a 9.00
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	3000
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L	400
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	800

Tabla 3 Límites de carga AQUARISC

6. Opciones para el tratamiento de aguas residuales del lavado del café.

En el diseño del sistema primario y del pretratamiento se deben tener en cuenta una serie de condicionantes que afectan al diseño de los mismos. Por una parte se debe diseñar una línea de tratamiento de aguas que pueda escalarse, para primero probar su eficiencia con el prototipo REAGRITECH que se va a instalar en el parque, y por qué una de las ideas en las que se basa el proyecto es en el diseño de un sistema de tratamiento de aguas que pueda adaptar de forma fácil a las distintas plantas de beneficiado de café que existen en la zona (independientemente de su volumen).

El diseño del sistema previo al paso del agua residual por el prototipo REAGRITECH, se ha dividido en dos, en la primera fase se estudia la viabilidad de la idea planteada a la escala del prototipo, y posteriormente se estudia su viabilidad a escala real.

6.1 Condicionantes:

- Espacio disponible: En el Parque tecnológico del Café TECNICAPE, se dispone de unos espacios limitados en los que implementar el sistema completo de tratamiento de aguas.

En una fase anterior al proyecto, se ha realizado un estudio sobre dos de las zonas en las que podría implementarse el sistema.

Si bien es cierto que el espacio disponible no presenta un problema en la primera fase del diseño. En el caso del diseño a tamaño real si puede llegar a serlo.

A continuación se muestran las dos alternativas presentadas para la implantación del prototipo REAGRITECH, en ambos casos se modificaría el pretratamiento existente, para instalar la alternativa escogida.

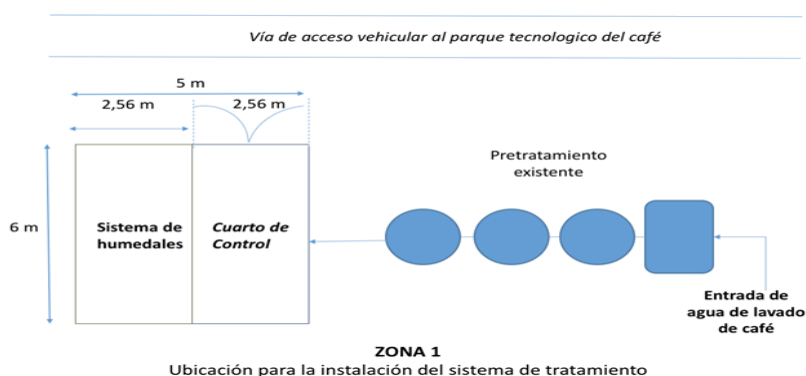


Imagen 7 Distribución de espacios de la zona 1 para la instalación del sistema de tratamiento de humedales AQUARISC

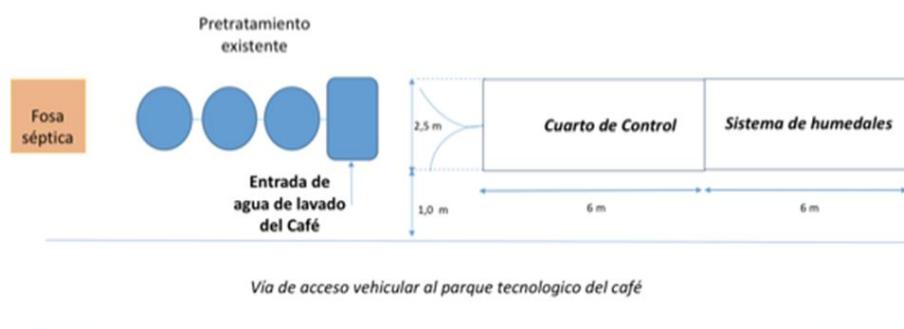


Imagen 8 Distribución de espacios de la zona 2 para la instalación del sistema de tratamiento de humedales AQUARISC

- Económicos: Aunque no se tenga una cifra “tope” el factor económico del coste del tratamiento es un condicionante clave, tanto el coste de ejecución como el de explotación, ya que si la solución adoptada presenta unas inversiones asumibles por parte de las industrias beneficiarias del café se podrá implantar en un número de industrias mayor.
- Medioambientales: Como es evidente, el impacto ambiental de la solución adoptada será clave, el condicionante medioambiental podemos dividirlo en dos. Por un lado, tenemos el impacto visual que presentara el sistema de tratamiento de aguas una vez implantado. Dicho impacto no se considera de gran importancia, ya que nos encontramos en un parque industrial. Por otro lado, existe el impacto ambiental que presentara el tratamiento con el vertido de las aguas al medio natural, este impacto va relacionado de forma directa con la eficiencia de la línea de tratamiento.

7. Alternativas.

A continuación se presentan las diferentes soluciones propuestas como pretratamiento y tratamiento primario-secundario.

NOTA: El pre dimensionamiento de las alternativas se ha realizado utilizando como base un volumen de 1m³/d. Esta modificación se ha planteado buscando una simplificación del cálculo en la fase de planteamiento de alternativas.

7.1 Filtro de arena

Filtración por medio granular.

Actualmente, en las instalaciones de TECNICAFFE, encontramos un prototipo en la cadena de tratado de las aguas mieles basado en la filtración de las aguas residuales utilizando un medio granular. En este caso el medio granular es una combinación entre la borra de café y arena. Aunque este sistema se encuentra en fase experimental, la posibilidad de poder reaprovechar la borra de café generada durante el beneficiado del café resulta interesante.

En la primera de las alternativas a estudiar como posibles soluciones al pretratamiento de las aguas residuales del lavado del café, se ha considerado la instalación de un sistema de filtrado basado en el paso del agua por un medio granular.

Previo a la definición del sistema, se debe realizar un análisis de cómo funciona esta metodología de tratado de aguas, y cuáles son sus posibles alternativas en la fase de diseño. Dependiendo de los caudales, presiones o materiales de los que se dispone para el proyecto.

Debemos tener en cuenta, que existen distintos grupos de filtros, y que cada uno de ellos da respuesta a unas condiciones de contorno, las cuales se deben tener en cuenta para un correcto dimensionamiento del sistema.

El funcionamiento básico de este sistema, consiste en forzar el paso de las aguas residuales por un medio granular (sílice, carbón activo CAC), eliminando así parte de la MES que esta contiene.

Uno de los parámetros básicos en el diseño de los sistemas de filtrado es el diámetro de las partículas que lo forman, en función de este se obtendrá la porosidad del filtro y por consiguiente la pérdida de carga, de esta forma se relaciona de forma directa, el rendimiento del filtro con el diámetro de sus partículas.

Debidas las condiciones que afectan al proyecto, se ha realizado una discusión entre dos de las categorías más comunes de filtros, el sistema lento y el sistema rápido.

El funcionamiento del sistema de filtrado lento se basa en forzar el paso del agua por una “cama” de un único material (mono capa), normalmente de arena silíceo y de un espesor entre 0.6-1m. El vertido del agua se realiza de forma directa en la superficie del filtro.

La naturaleza de este sistema genera la formación de una biopelícula en los primeros 10cm de filtro (aproximadamente), esta biopelícula debe dejarse madurar entorno a unas 2 semanas, para poder garantizar el funcionamiento idóneo del filtro.

Es cierto que con el tiempo esta misma película provoca una pérdida de eficiencia del filtro por lo que debe ser eliminada. En el caso de los filtros lentos, la frecuencia con la que se debe eliminar esta biopelícula es de unos 2 a 3 meses y la limpieza del filtro se realiza de forma manual, con un rastrillo se retira la costra formada por la biopelícula en los primeros 10cm de material granular. (Andres.D 2011)

A continuación se puede ver un gráfico en el que se muestra la pérdida de carga que sufre el filtro a lo largo del tiempo.

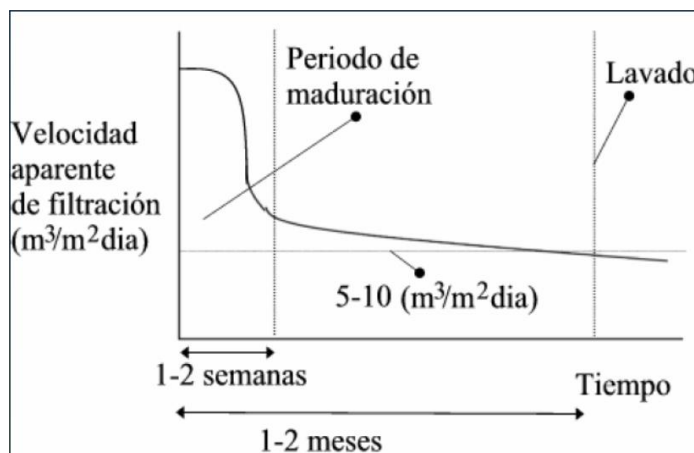


Imagen 9 Evolución de la pérdida de carga para un filtro lento a lo largo del tiempo

Como se puede observar en el gráfico, la vida del filtro se divide en tres fases, explicadas anteriormente, y dependerá fundamentalmente de las cargas de entrada, el acortamiento o alargamiento de cada una de estas fases. Permitiendo así una disminución en cuanto a necesidad de lavado del filtro.

En cuanto a las características de diseño estructural, el filtrado mediante el método lento requiere de espacio suficiente para hacer frente al caudal de diseño, ya que el parámetro de diseño básico del mismo es la CHS (carga hidráulica superficial) y esta relaciona el volumen de entrada con las dimensiones del filtro.

El esquema básico de un filtro lento es el siguiente:

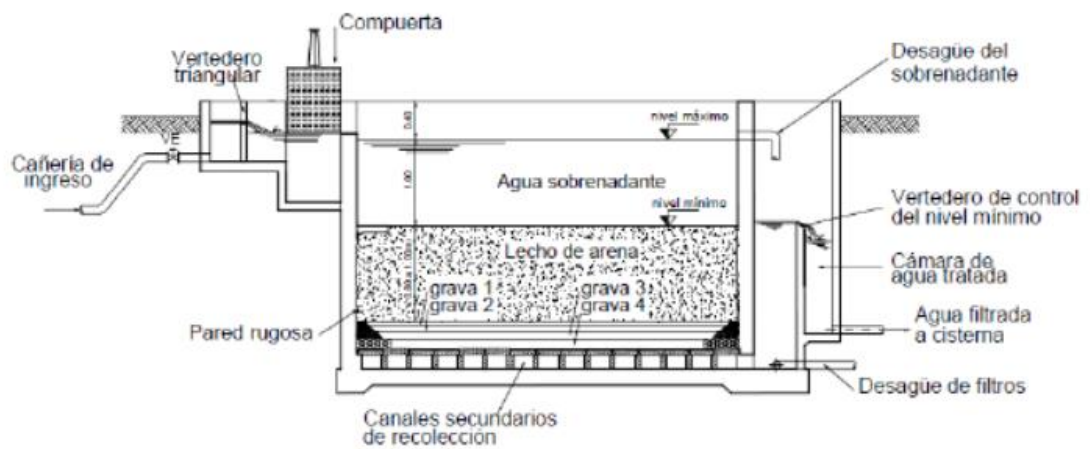


Imagen 10 Esquema de los elementos que conforman un filtro

En el caso de diseño, según los datos obtenidos en el parque, la producción de aguas residuales en el proceso de lavado del café es del entorno de los 8000l/d (8m³/d).

A continuación se pretende realizar un pre diseño para poder conocer las dimensiones necesarias (de forma aproximada) en caso de adoptar este sistema.

Presuponiendo un funcionamiento normal del filtro, se ha fijado una carga hidráulica superficial (CHS) de 10m/d.

$$CHS \left(\frac{m}{d} \right) = \frac{Q \left(\frac{m^3}{d} \right)}{S \left(m^2 \right)}$$

$$10 \frac{m}{d} = \frac{8 \frac{m^3}{d}}{S \left(m^2 \right)}$$

$$S_{tot} = \frac{8 \frac{m^3}{d}}{10 \frac{m}{d}} = 0.8m^2$$

La superficie total (mínima) necesaria en el caso de estudio es de 0.8m², debida a la naturaleza del sistema, que requiere un funcionamiento constante durante las 24 h, se hace necesaria la instalación de dos unidades de filtrado independientes. De esta forma, en el momento del paro para su mantenimiento, el agua se recirculara al segundo filtro, evitando la interrupción del proceso.

Como el registro de caudales y de carga contaminante es únicamente de un año, es previsible que existan variaciones importantes, de igual forma se prevé un posible crecimiento en el sistema, es por eso que se ha optado por dimensionar ambos filtros con una superficie de 1m².

La profundidad del filtro será de 0.8m, garantizando así un grueso suficiente para la obtención de un agua con una carga contaminante adecuada.

En lo referente al material del filtro, se ha idealizado un $d_{60} = 0.6mm$ y un $d_{10} = 0.4mm$ de lo que se obtiene un $C_u = 1.5$.

El esquema de funcionamiento queda según la siguiente configuración:



Imagen 11 Esquema de la ubicación de los filtros

En cuanto a las dimensiones de los filtros:

Perfil:

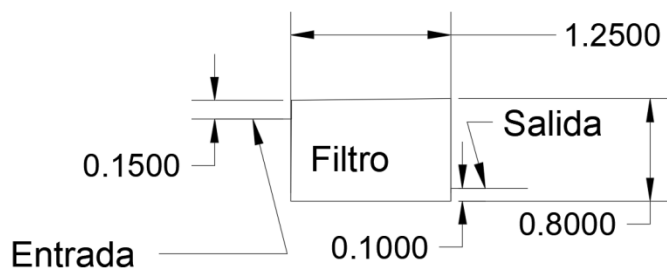


Imagen 12 Pre dimensionamiento del filtro (perfil) unidades en m

Planta:

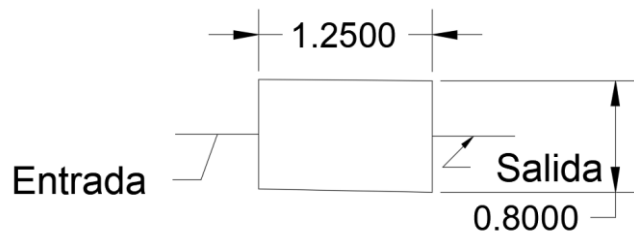


Imagen 13 Pre dimensionamiento del filtro (planta) unidades en m

El otro sistema que se ha tomado como alternativa ha sido el filtrado por el método rápido.

En este caso, el filtro se compone de una o más capas filtrantes como en el caso anterior. La diferencia entre ambos se encuentra en la utilización de bombas para dar presión al agua en la entrada. De esta forma, se consigue un paso a mayor velocidad del agua por los poros del medio filtrante y por lo tanto un volumen tratado superior que en el caso anterior. La aplicación de sistemas de presión, permiten el aprovechamiento total del ancho del filtro, evitando así la formación de la biopelícula. (Zamorano.M 2004)

Debemos tener en cuenta, que este sistema requiere una aportación energética superior que en el caso de la filtración lenta.

Por otro lado, el mantenimiento de este tipo de sistemas no se realiza de forma manual, sino que se fuerza el paso de aire a presión en sentido inverso al que normalmente tiene el filtro.

A continuación se muestra la evolución del filtro a lo largo del tiempo:

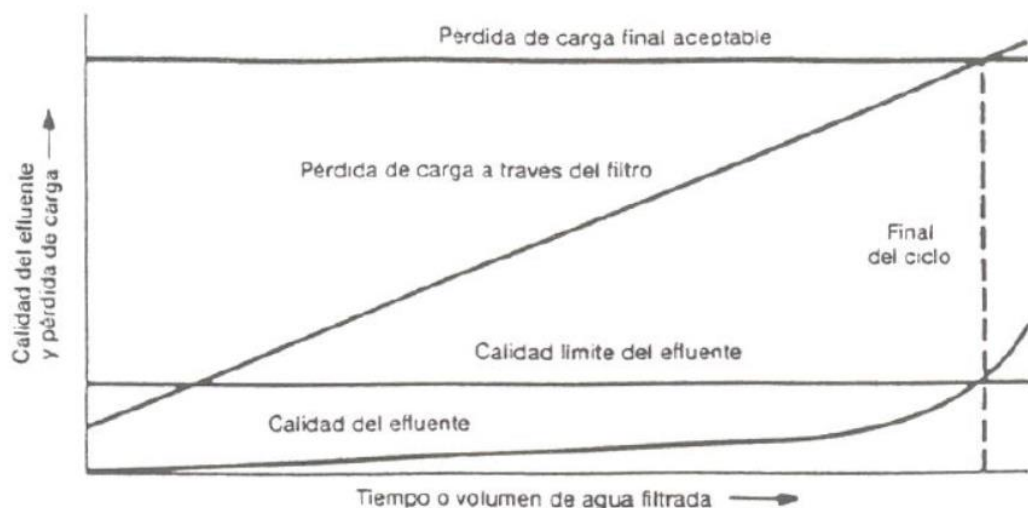


Imagen 14 Evolución de la pérdida de carga en el filtro a lo largo del tiempo

Se puede ver como la pérdida de carga aumenta a lo largo del tiempo, esto se da como respuesta a la ocupación de los poros del filtro (colmatación), forzando así su limpieza. La frecuencia de limpieza de estos filtros, aunque depende de las condiciones de carga contaminante del agua de entrada, ronda 1-2 días.

El sistema de filtrado rápido sigue el siguiente esquema:

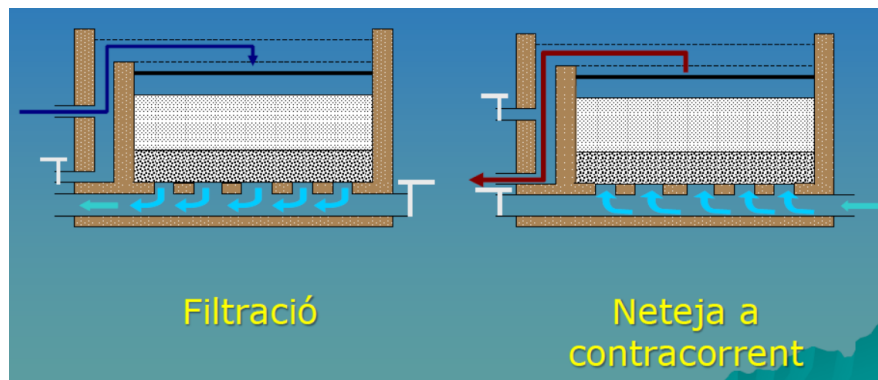


Imagen 15 Funcionamiento básico de un filtro rápido y de su proceso de limpieza

En cuanto a las dimensiones necesarias en el caso del sistema rápido, se ha observado que son iguales que en el caso anterior, ya que un filtro de superficie inferior a 1m² no garantiza su buen funcionamiento, debidos a la posible filtración del agua por el punto de contacto con las paredes del mismo.

Una vez estudiados los dos sistemas, se ha discutido la elección del que se considera más adecuado en el proyecto en el que nos encontramos.

A continuación se puede ver una tabla comparativa entre los dos métodos, en función de los parámetros básicos del sistema:

Comparación entre filtros		
Característica	Lento	Rápido
Película biológica	Si	No
Velocidad de infiltración	5-10 m/d	250-300 m/d
Frecuencia de lavado	1-2 meses	1-2 días
Método de limpieza	manual	a contra corriente

Tabla 4 Comparacion entre metodologias de filtrado

Una vez comparados, y teniendo en cuenta los condicionantes del proyecto, se ha optado por el sistema lento como el más adecuado. Esto se da a que en las instalaciones de SUPRACAFE, los volúmenes de agua a tratar no son muy elevados en ningún momento, y en cualquier caso, el sistema de tratamiento de aguas se ve limitado por la capacidad del prototipo REAGRITECH, por lo que la necesidad de filtrar un gran volumen de agua no se da. Otro de los motivos por los que se ha decidido que el sistema lento es mejor es la necesidad de mantenimiento y las características del mismo frente al sistema rápido.

El sistema rápido obliga a tener más de un filtro, y realizar las tareas de limpieza mediante el paso de aire cada dos días, este mantenimiento es más costoso que el limpiado de forma manual que requiere el sistema lento, así mismo la frecuencia necesaria en el caso del método lento es claramente inferior.

Por último, la necesidad de aporte de energía constante que presenta el sistema rápido lo convierte en un sistema caro a nivel de explotación frente a su alternativa, con lo cual y viendo los inconvenientes expuestos queda claro que la opción más adecuada en este caso es la instalación de filtros lentos.

Esquema final:



Imagen 16 Esquema del sistema global, Alternativa 1 + Prototipo

Rendimiento

Este sistema de tratamiento presenta una gran variación en su rendimiento, esto se debe a la vulnerabilidad que sufre frente agentes externos como los cambios de temperatura bruscos.

Si se consiguen estabilizar los factores externos, se ha demostrado que el sistema de filtración puede presentar hasta un **85% de eliminación de SST y un 20% de eliminación de DBO**. (N.Gutierrez 2014)

Coste de construcción:

Aunque los costes exactos se deberán estudiar en profundidad en el caso de que esta opción se de por buena, la inversión necesaria para la construcción de este sistema ronda entorno a los 50-100 dólares por m² de superficie.

Este precio puede verse afectado por la dificultad de encontrar áridos validos en la zona, o por limitaciones en cuanto a mano de obra.

Parámetros básicos para su diseño:

- Carga de contaminantes.
- Tamaño de partículas flotantes.
- Frecuencia admisible de colmatación
- Carga hidráulica superficial.

Ventajas:

- Sencillez constructiva.
- Reaprovechamiento de la borra del café.
- Mejora simultanea de la calidad física, química y bacteriológica del agua
- No necesita productos químicos
- No requiere aporte de energía
- Poca producción de lodos

Inconvenientes:

- Bajo rendimiento en función de la temperatura
- Posibles problemas de colmatación.
- Periodicidad del mantenimiento.
- Fragilidad frente presencia de biocidas
- Cargas de trabajo entre 20-30 UNT, máximo 50-100 UNT.

7.2 Tanque imhoff

La segunda alternativa al tratamiento primario de las aguas residuales del lavado del café es la instalación de un tanque imhoff.

Este sistema presenta una serie de ventajas frente a los sistemas convencionales, aunque se debe tener en cuenta que sus capacidades de tratamiento son limitadas.

Las ventajas principales de este sistema radican en la necesidad limitada de espacio para su funcionamiento y las necesidades de mantenimiento.

En este caso el mantenimiento requerido por el sistema, es básicamente, la extracción de los fangos generados en el interior del tanque con una periodicidad que dependerá de la generación de los mismos.

El sistema se basa en la digestión anaeróbica de los fangos generados en el tanque debido a la floculación y posterior decantación. En este caso, gracias a la separación en varias cámaras del tanque, los fangos sedimentan y se separan del efluente.

El esquema básico de un tanque imhoff es el siguiente:

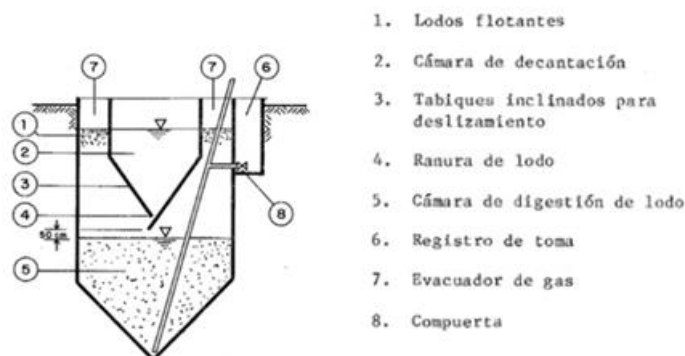


Imagen 17 Elementos de un tanque Imhoff

La capacidad de eliminación que presentan estos sistemas es del entorno de un **30-60% para la materia en suspensión (MES), y de un 25-40% de la DBO.**

En cuanto a la inversión necesaria para la instalación y explotación de este sistema, se calcula un coste aproximado de 170 dólares por habitante equivalente (para la construcción) y un coste de explotación en torno a los 40 dólares anuales por habitante equivalente.

La generación de lodos en el interior del tanque tiene como consecuencia un vaciado periódico, cuya frecuencia oscilara entre los 3 a 6 meses, en función de las características del efluente.

Pre dimensionamiento:

Para el Pre dimensionamiento del tanque imhoff se ha utilizado como referencia la tabla de criterios de diseño extraída del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS-2000.

CRITERIOS DE DISEÑO		
PARAMETRO	VALOR	UNIDAD
Compartimento de sedimentación		
Relación longitud a ancho	2:1 a 5:1	
Pendiente	1,25:1 a 1,75:1	
Abertura de las ranuras	15 a 30	cm
Proyección de las ranuras	15 a 30	cm
Baflé de espumas:		
encima de la superficie	45 a 60	cm
debajo de la superficie	15	cm
Carga de desbordamiento superficial	25 a 40	m ³ /m ² *d
Tiempo de retención	2 a 4	horas
Área de ventilación del gas		
Área superficial	15 – 30	% del total
Ancho de la abertura	45 a 75	cm
Cámara de digestión de lodos		
Volumen	55 a 100	litros / cápita
Tubería de recolección de lodos	200 a 300	mm
Profundidad debajo de la ranura hasta la superficie superior del lecho de lodos	30 a 90	cm
Profundidad del tanque (desde la superficie del agua hasta el fondo del tanque)	7 a 10	m

Tabla 5 Dimensiones recomendadas en la construcción de un tanque imhoff

Suponemos una CHS igual que en el caso de los filtros, 10m*d.

Teniendo en cuenta que el cálculo de la superficie necesaria es igual que para los cálculos, se obtiene un área de 0.8m², en este caso y debida a la naturaleza de funcionamiento de los sistemas de sedimentación, se hace

necesario aumentar dicha área. Con el aumento del área conseguimos también cumplir las proporciones fijadas en la tabla de la RAS-2000.

En este caso, el área del sedimentador se ha fijado en 2m², y el tiempo de permanencia se ha establecido en 2horas.

La altura del tanque será de 8m.

Según las estimaciones de los costes de construcción del sistema, y en base a la carga máxima de contaminantes registrados en la salida de la planta, se ha estimado una carga equivalente a 1620 habitantes.

$$DBO_5 = 12124 \frac{mg}{l}$$

$$Q = 8000 \frac{l}{d}$$

$$DBO * Q = 96992 \frac{g}{d}$$

$$1HE = 60g/dia$$

$$HE = \frac{96992}{60} = 1617 \approx 1620hab$$

Con esto obtenemos un coste estimado de **226800** dólares.

Esquema del sistema:

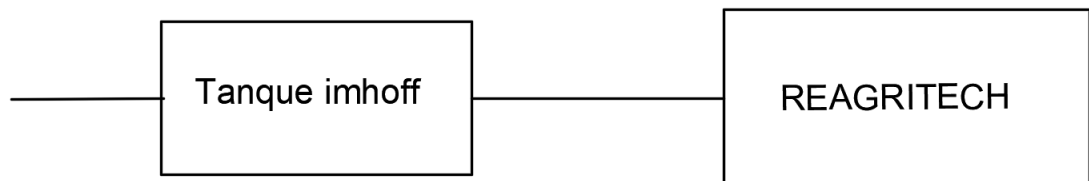


Imagen 18 Esquema global Alternativa 2 + Prototipo

7.3 Filtro de arena + tanque imhoff

La tercera de las alternativas a estudiar combina las dos alternativas anteriores. En este caso se plantea la viabilidad, tanto a nivel de rendimiento como económico, de combinar los dos sistemas anteriores (filtrado y tanque imhoff).

En este caso, y gracias a combinar ambos sistemas, lo que se consigue es una disminución de tamaños en los elementos que conformarían el sistema y a su vez un rendimiento de eliminación de contaminantes superior que en los casos anteriores.

Debemos tener en cuenta que esta alternativa requerirá de un mantenimiento superior ya que se dan de forma simultánea la generación de lodos en el interior del tanque y la necesidad de limpieza del filtro.

Por lo que a las dimensiones del filtro respecta, estas deben ser iguales que las presentadas en la alternativa 1 ya que en ese caso y debido a los volúmenes de trabajo, no es viable un filtro de menor tamaño.

Las dimensiones del tanque imhoff sí que pueden verse reducidas, ya que la CHS de entrada es inferior gracias al trabajo realizado por los filtros.

En este caso, teniendo en cuenta los parámetros de rendimiento de ambos sistemas, la eliminación de **DBO podría llegar al 70%**, dependiendo de las características del filtro y de las condiciones de trabajo del tanque.

Por lo que hace referencia a la inversión inicial, teniendo en cuenta que el coste de los filtros no variara frente a la opción 1, se debe analizar el ahorro que supone un tanque de dimensiones inferiores.

Gracias a la instalación del filtro, la carga contaminante que debe tratar el tanque es un 40% menor, con lo que el coste disminuye en igual medida

De esta forma, se estima un coste aproximado de 135000 dólares, como se puede ver el coste es claramente inferior que en el caso de la alternativa 2 gracias a la implementación de un sistema de filtrado. Y los rendimientos de eliminación son de igual forma, claramente superiores que en cualquiera de las alternativas anteriores.

Por último, debemos tener en cuenta que los requerimientos de espacio en esta alternativa son algo superiores que en los casos anteriores, por lo que se deberá estudiar bien el emplazamiento en la planta para realizar un buen encaje de los elementos que conforman el sistema de tratamiento.

Esquema del tratamiento:

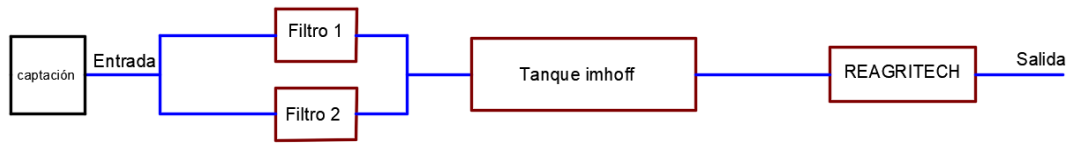


Imagen 19 Esquema global Alternativa 3 + Prototipo

Ventajas:

- Mayor rendimiento.
- Menor mantenimiento.

Inconvenientes:

- Mayor coste de construcción
- Requerimiento de espacio superior.

7.4 Biodigestor

Esta alternativa basa su funcionamiento en la instalación de un biodigestor. Los biodigestores actualmente son un sistema muy extendido para tratamiento de aguas residuales, gracias a sus características han demostrado ser una opción muy competente tanto en rendimientos como en costes.

El funcionamiento de un biodigestor se basa en la fermentación de la materia orgánica del agua en un entorno anaeróbico (sin oxígeno), este proceso genera una serie de residuos. El primero de ellos es el biogás, este está formado básicamente por metano CH_4 y dióxido de carbono o CO_2 , en función de la naturaleza del contaminante las proporciones de ambos oscilarán entre un 50-70% para el CH_4 y un 30-40% para el CO_2 , el porcentaje restante está formado por hidrógeno H_2 y ácido sulfhídrico H_2S . Gracias a los componentes de este biogás, le dan unas propiedades energéticas aprovechables para el consumo, ya puede ser en cocinas o si se produce en un volumen considerable, pequeñas centrales generadoras de electricidad. La posibilidad de reaprovechar el biogás como fuente de energía se hace interesante, ya que de forma indirecta se reducen los gastos de explotación.

Por otro lado, se genera un residuo líquido en forma de fangos, estos fangos pueden reaprovecharse como fertilizantes, gracias a su alta concentración de nitratos. De esta forma, se puede ver que en el caso del biodigestor sus dos residuos son reaprovecharlos en las instalaciones del parque, lo que le sitúa como una buena opción gracias a su pequeño impacto ambiental.

En este caso, el rendimiento del biodigestor se ve ligado de forma directa a la temperatura ambiente en la que se encuentre. Los procesos biológicos que se dan en su interior son más rápidos a temperaturas ambientales elevadas, por lo que es posible que el rendimiento del sistema varíe en función de las condiciones climáticas. En este caso, en las instalaciones del Parque Tecnológico del Café, la temperatura media anual es de unos 19°C , con lo cual se espera un funcionamiento adecuado del biodigestor.

En el siguiente gráfico se puede observar como decrece la producción de biogás en función de la temperatura.

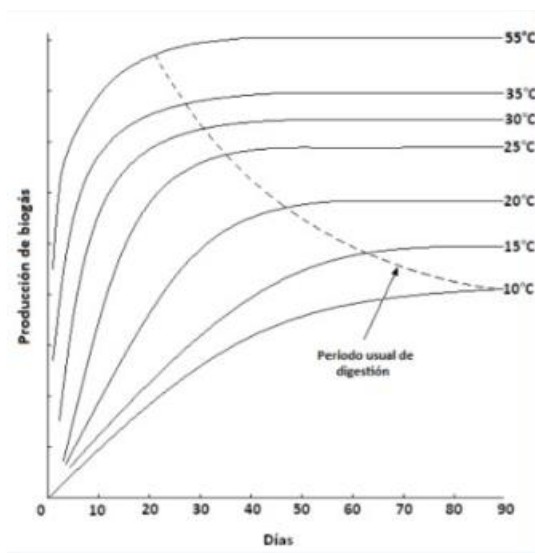


Imagen 20 Rendimiento de un biodigestor en función de la temperatura

Actualmente existe una gran variedad de biodigestores aunque básicamente se pueden dividir en dos grandes bloques. Por un lado existe la posibilidad de construir un biodigestor de hormigón, esta opción requiere de una inversión inicial elevada ya que la estructura resulta costosa de construir. La otra opción más común es la instalación de un biodigestor construido con plástico, esta opción tiene infinidad de variedades en el mercado, ya que se comercializan multitud de biodigestores de este tipo según las necesidades de cada situación.

En base a las características que presentan se ha realizado la siguiente comparativa:

Comparativa entre biodigestores		
Tipología	Ventajas	Inconvenientes
Plástico	Bajo coste	Menor vida útil
	Materiales ligeros	Fragilidad
	Baja complejidad a nivel constructivo	Baja presión de salida de gas
	Fácil mantenimiento	Materiales poco sostenibles
	Adaptabilidad frente al clima	
Hormigón	Mayor vida útil	Mayor dificultad constructiva
	Diseño compacto	Difícil reparación
	Menor superficie requerida	Mayor coste de construcción
	Fácil mantenimiento	

Tabla 6 Comparativa entre Biodigestor de hormigón y Biodigestor de plástico

Una vez vistas las diferencias entre ambos, se ha optado por la construcción de un biodigestor de plástico ya que presenta una mayor flexibilidad en cuanto al clima y a los volúmenes de trabajo. Otro factor determinante es la diferencia en el coste, haciendo de la opción escogida la más económica con diferencia

A continuación se muestra el esquema básico de los componentes con los que cuenta un biodigestor:

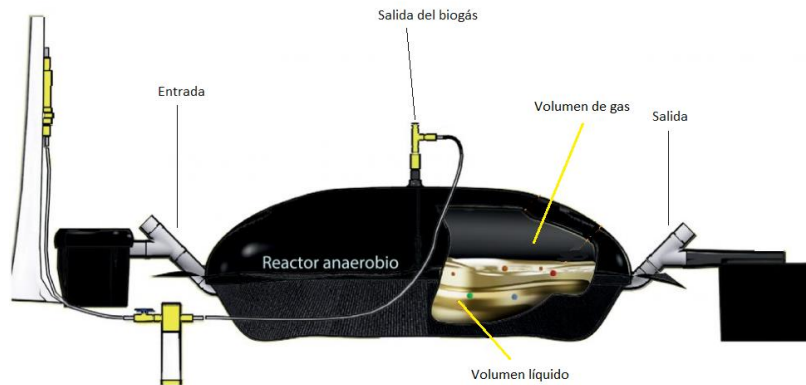


Imagen 21 Elementos de un biodigestor

Las partes fundamentales del biodigestor son:

- Entrada: Conducción por la que entra el agua residual.
- Salida: Conducción de salida para el agua tratada
- Salida del biogás: Conducción situada en la zona superior, por la que se expulsan los gases generados durante el proceso, en función del uso que se tenga previsto para el biogás se instalara un sistema catalizador o no.
- Volumen líquido: Ocupa la parte inferior del tanque
- Volumen gas: Ocupa la parte superior del tanque
- Válvula de seguridad: Se recomienda la instalación de una válvula en el conducto del biogás para evitar sobrepresiones en el tanque.

Pre dimensionamiento y coste

Basándonos en los volúmenes diarios de aguas residuales que deberá tratar el biodigestor, se ha optado por adaptar uno de los muchos biodigestores que se comercializan actualmente.

Se ha optado por un biodigestor de la marca ROTOPLAST, de tipo horizontal y con capacidad para 10000litros. Las dimensiones del mismo se muestran en la siguiente figura:



Imagen ilustrativa

Capacidades y medidas

Capacidad nominal (Litros)	Medida (cm).	
	A	B
4.500	168	254
7.000	168	365
10.000	168	475
12.000	168	585
14.000	168	695
16.000	168	807
18.000	168	917
20.000	168	1.027

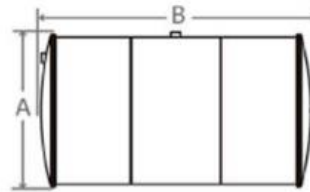


Imagen 22 Medidas comerciales de un biodigestor

En el caso de que se dé por buena esta opción, se deberá calcular el precio de forma exacta. Gracias a la cantidad de biodigestores que se comercializan, se sabe que el precio aproximado de este sistema ronda los 40 dólares por m³, en este caso el coste aproximado es de 400 dólares.

Rendimiento:

El rendimiento del sistema está muy ligado a las condiciones ambientales en las que opera y en la carga contaminante de entrada, de todas formas, el sistema de tratamiento de aguas que se lleva a cabo en el biodigestor puede llegar a **rendimientos del entorno del 90%, para la eliminación de DBO (caso optimo).** (Olaya. 2004)

7.5 Filtro de arena + biodigestor

De la misma forma que en el caso de la alternativa 3 se combinaba el sistema de filtrado con el tanque imhoff, en este caso se plantea la viabilidad de combinar este mismo sistema de filtrado con la instalación de un biodigestor.

En el planteamiento de esta alternativa debemos tener en cuenta que como en los casos anteriores, los filtros no pueden tener un tamaño inferior al marcado en el primer caso, ya que esto podría derivar en un mal funcionamiento de los mismos.

De la misma forma, se mantiene el modelo de biodigestor escogido en la alternativa anterior, ya que se ha considerado que el ahorro económico que presentaría la instalación de uno de menor dimensión no compensa la disminución de capacidad de tratamiento del sistema.

La idea de unir un biodigestor al sistema de filtros se basa en aumentar el rendimiento del sistema de tratamiento de aguas residuales, independientemente de la temperatura exterior. Con la primera etapa del tratamiento se consigue reducir la carga de contaminantes en el agua, y a su vez estabilizar el pH de la misma (el pH puede afectar en el rendimiento del biodigestor)

Los costes de instalación y explotación en este caso seguirían siendo claramente inferiores que en el caso del tanque imhoff. Para este caso se estima un coste aproximado de 900 dólares para el global del sistema.

El rendimiento global del sistema podría llegar al 70-80% en función del material disponible para el filtro y de las condiciones de temperatura ambiente.

El inconveniente principal que presenta esta alternativa es el requerimiento de espacio, ya que el funcionamiento de los filtros se basa en la superficie que estos ocupen, y el biodigestor tiene unas dimensiones considerables. Del mismo modo, en el caso de que el volumen a tratar aumentase considerablemente, se debería estudiar la posibilidad de cambiar de sistema, o de instalar un biodigestor de hormigón con una dimensión mayor.

En lo referente al mantenimiento, en este caso básicamente se debería realizar el limpiado de los filtros y un vaciado periódico del biodigestor, que en este caso será con una frecuencia inferior que la de la alternativa 4, ya que la producción de fangos en su interior disminuirá.

Del mismo modo que la generación de lodos disminuye, el volumen de biogás que se generara en el digestor será menor que en la alternativa anterior, esto provocara un redimensionamiento del sistema de extracción de gas y se deberá calcular que volumen se genera para poder estimar la rentabilidad de un sistema de generación de energía o no.

De esta forma, el esquema del sistema queda de la siguiente forma:

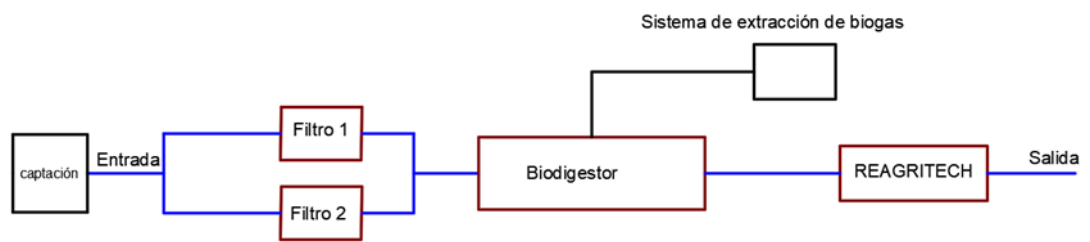


Imagen 23 Esquema global, Alternativa 5 + Prototipo

7.6 Biorreactor de Membrana

En esta alternativa, se presenta un sistema de tratamiento de aguas residuales relativamente nuevo y con el que además de conseguir un rendimiento de eliminación de contaminantes realmente elevado, y unas dimensiones compactas.

El sistema MBR o Bioreactores de Membrana se conforma de dos partes integradas en un único cuerpo. En la primera fase se encuentra el reactor biológico y en la segunda se encuentra el separador físico de la biomasa y el agua, mediante una filtración con membranas.

Estos sistemas de tratamiento de aguas, han demostrado ser de una gran eficiencia ya que permiten un control prácticamente perfecto de parámetros clave como el tiempo de retención del fango.

En el ámbito económico, esta solución se muestra competitiva frente a la opción de un tratamiento convencional si se dan los siguientes condicionantes:

- Necesidad de disminuir la producción de fangos.
- Necesidad de un alto grado de depuración (vertido en zonas sensibles)
- Reutilización del agua tratada.
- Necesidad de espacio

Debemos tener en cuenta que existen diversos diseños basados en este sistema, de esto se desprenden dos opciones a considerar para el tratamiento. La solución que se escoja deberá tener en cuenta una serie de criterios, básicamente de dos tipos:

Criterios en base a la inversión:

- Equipos electromecánicos.
- Tratamiento de los fangos.
- Vida media de la instalación y equipos.
- Posibles futuras ampliaciones

Criterios en base a la explotación:

- Fiabilidad.
- Mano de obra especializada en la fase de explotación.
- Recambios de membranas y equipos.

En el proceso de diseño, independientemente de la solución adoptada se debe diseñar un pretratamiento acorde a la misma debido a que cada solución tiene sus peculiaridades a tener en cuenta a la hora de conseguir un tratamiento eficiente.

Bioreactor de Membrana sumergida.

En esta configuración, las membranas se instalan en el interior del propio reactor biológico, eliminando las necesidades de bombeo y aprovechando la agitación mecánica de la aireación.

El esquema que sigue esta alternativa al tratamiento es el siguiente:

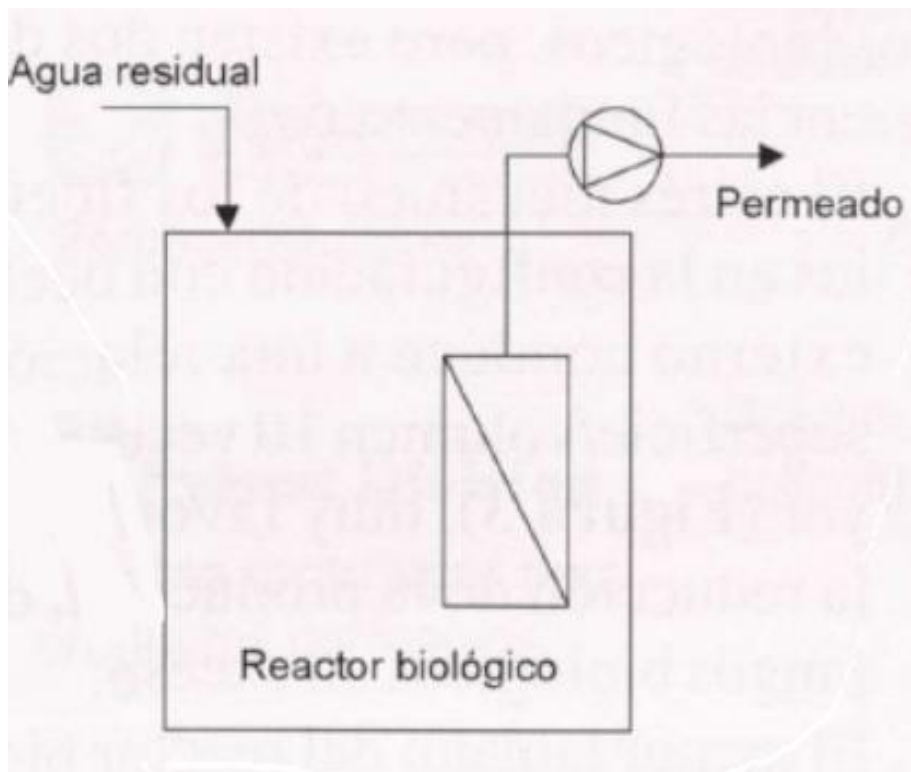


Imagen 24 MBR de membrana sumergida (Lopetegui, 2004)

En este caso, la eliminación de un sistema de bombeo produce un ahorro económico considerable, tanto en la fase de construcción como en la de explotación.

Por otro lado, el hecho de unificar el sistema en un solo bloque presenta un inconveniente a nivel de mantenimiento, produciendo una parada si se quiere realizar la limpieza de las membranas.

Bioreactor de Membrana externa.

En esta configuración, las membranas se encuentran en un módulo externo al cual se debe bombear el agua del reactor biológico. La ventajas de este módulo residen en que el propio modulo sirve de contenedor de limpieza para las membranas durante la fase de mantenimiento.

El esquema que sigue esta alternativa al tratamiento es el siguiente:

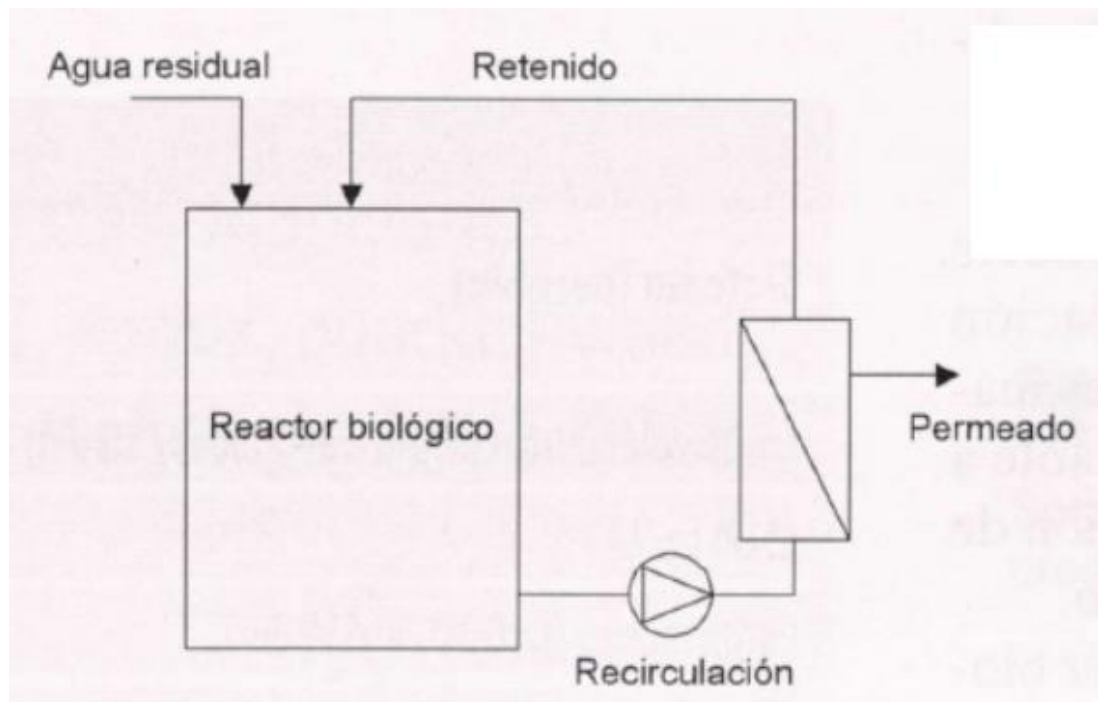


Imagen 25 MBR membrana externa (Lopetegui, 2004)

El inconveniente principal que presenta esta alternativa, es la necesidad de instalar un sistema de bombeo.

Se debe puntualizar, que la opción escogida deberá basarse en las condiciones de contorno para el punto en el que se quiera instalar, teniendo en cuenta parámetros de espacio, contaminantes del agua o posibilidad de la obtención de recambios.

Un punto positivo a destacar en este sistema es la adaptabilidad que presenta frente a modificaciones futuras, criterio que se ha utilizado de forma constante en el proceso de diseño de las alternativas.

El mayor inconveniente que presenta esta alternativa lo encontramos en los posibles costes de explotación, ya que se debe realizar un mantenimiento y recambio de las membranas con una periodicidad que dependerá de los parámetros de diseño, pero que independientemente de ellos puede resultar muy costoso si no existe un proveedor cercano ni mano de obra especializada en la zona.

Rendimiento:

Independientemente de la metodología MBR escogida, **el sistema presenta un nivel de eliminación de contaminantes muy alto, llegando al 90%.** En este caso, el proceso no se ve afectado por las condiciones atmosféricas, ya que los tanques donde se dan las reacciones biológicas están aislados del medio.

Coste:

Los costes de implantación del sistema MBR variaran en función de las características del sistema, en cualquier caso, se trata de una alternativa con un coste económico elevado ya que necesita de mano de obra especializada y unas instalaciones complejas a nivel tecnológico.

7.7 Floculación-decantación tradicional

En esta última alternativa se plantea una solución al tratamiento de aguas residuales basada en el sistema habitual de floculación-decantación.

En este caso, y teniendo en cuenta la procedencia de las aguas residuales que se quieren tratar, se pueden realizar una serie de simplificaciones en el esquema habitual. Con estas simplificaciones lo que se pretende es obtener un ahorro considerable a nivel económico y de espacio.

Estas simplificaciones son posibles gracias a que se conoce perfectamente el origen de las aguas a tratar, y esto nos permite saber que procesos son realmente imprescindibles y cuales se pueden eliminar de la línea habitual.

Para el caso que nos ocupa, se ha simplificado el esquema de funcionamiento y se ha planteado una solución basada en tres etapas.

En la primera etapa, se realiza una decantación primaria de las aguas residuales, esto se hace en un decantador primario que funciona por gravedad. En él se produce una decantación de la MES, generando un fango primario que debe retirarse con periodicidad.

El rendimiento aproximado de este tipo de decantadores ronda el 60% para eliminación de MES y el 30% en eliminación de DBO.

De esta forma, se obtienen dos subproductos, el primero es un efluente con baja concentración de MES, pero con una gran cantidad de DBO disuelta.

El segundo son los fangos primarios mencionados con anterioridad, se debe tener en cuenta que debido a su composición, estos fangos producen olores desagradables por lo que deben tratarse de forma eficaz.

A continuación se muestra un esquema del decantador primario:

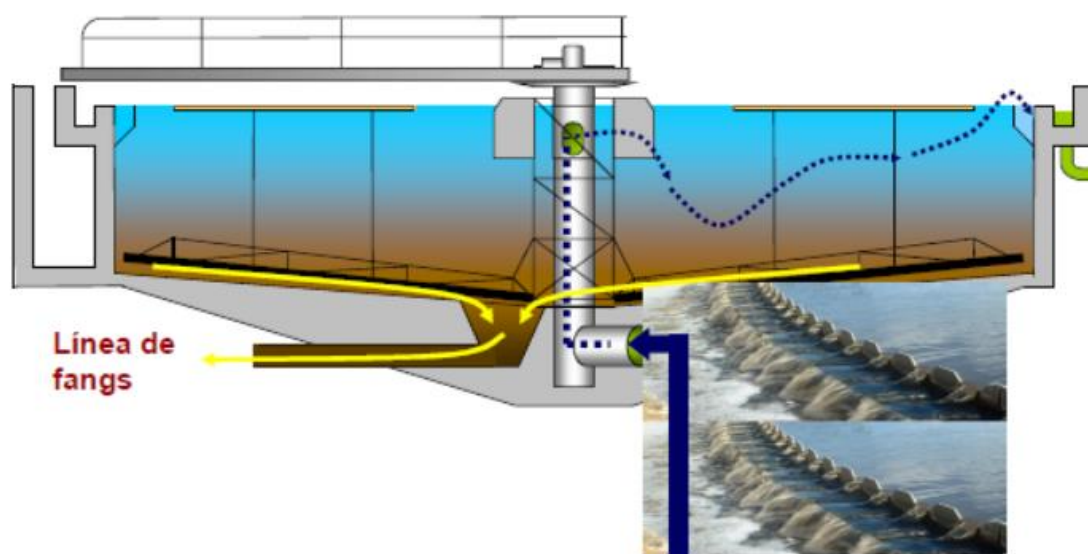


Imagen 26 Decantador primario

En cuanto a los parámetros de diseño de esta primera etapa, se muestran unos valores orientativos en la siguiente tabla:

Paràmetres de disseny	Unitats	Valor
Càrrega hidràulica superficial	m/dia	30-50 (a Q_M) 80-120 (a Q_P)
Temps de permanència	h	2-3 (a Q_M)
Calat	m	3-5
Pendent solera	cm/m	6-16
Velocitat gir pont (en decantadors circulars)	rev/hora	1-3

Tabla 7 Parámetros típicos de diseño

Para aumentar el rendimiento de esta primera fase, se puede realizar un tratamiento fisicoquímico. En este proceso se aplica un coagulante que reacciona con la MES (normalmente Fe^{3+} o Al^{3+}). En la reacción se generan unos floculo de mayor tamaño, agilizando el proceso de decantación.

Se debe tener en cuenta que este proceso tiene un coste mayor ya que se debe suministrar el coagulante de forma periódica, de igual forma la generación de lodos aumenta. En cuanto a rendimientos, la aplicación de este proceso aumenta el rendimiento de eliminación de la MES hasta valores del 90% y la DBO al 40%.

En la siguiente etapa del tratamiento (tratamiento secundario) se busca afinar aún más los niveles de eliminación. Esto se puede realizar de diversas formas, pero en el caso que nos ocupa se ha pensado en la aplicación del sistema de fangos activos.

El sistema de fangos activos se basa en la oxidación de la materia orgánica mediante una degradación aerobia. Durante este proceso, el efluente permanece en lo que recibe el nombre de reactor biológico, es en esta etapa en la que se forman los floculo que posteriormente se decantarán en el decantador secundario.

En el decantador secundario es donde se producirá una acumulación de los denominados fangos secundarios, y estos deben purgarse de forma periódica para garantizar un buen funcionamiento del sistema.

Con esta última etapa, se consigue eliminar la MES y la DBO iniciales a valores cercanos al 90%, haciendo de este un sistema muy eficiente.

Debemos tener en cuenta que este tipo de procesos son muy indicados para volúmenes elevados, ya que los elementos que conforman el tratamiento suelen ser de grandes dimensiones.

A continuación se muestra un esquema de cómo quedaría la línea de tratamiento de aguas residuales completa:

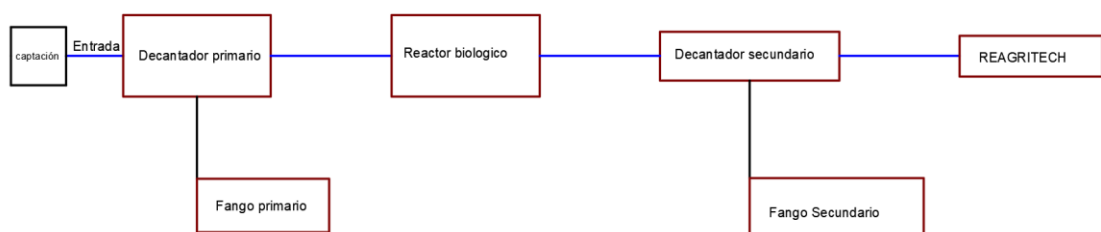


Tabla 8 Esquema global, Alternativa 7 + Prototipo

Los inconvenientes principales que presenta esta alternativa son:

- La necesidad de espacio suficiente para la implantación de todos los elementos que lo conforman.
- Coste de construcción elevado.
- Necesidad de realizar un tratamiento adicional a la línea de fangos, tanto primarios como secundarios.

8. Marco resumen comparativo de las alternativas.

A continuación se presenta de forma tabulada, los parámetros clave referentes a rendimiento y coste para las alternativas presentadas.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Alternativa 7
Eliminación DBO	20%	25-40%	70%	90%	95%	90%	90%
Eliminación SST	85%	30-60%	85%	50%	90%	90%	90%
Coste	50-100\$	>100.000\$	>100.000\$	400\$	600\$	>100.000\$	>100.000\$
Espacio	3m2	10m2	14m2	8m2	12m2	20m2	50m2
Vulnerabilidad	Alta	Baja	Moderada	Moderada	Baja	Baja	Baja

Tabla 9 Comparativa de alternativas

Se debe tener en cuenta, que al tratarse de un planteamiento de alternativas los valores son aproximados. Deberán calcularse de forma más precisa una vez fijada la alternativa

9. Análisis de alternativas.

Una vez expuestas las posibles alternativas al tratamiento previo que deben tener las aguas residuales al prototipo REAGRITECH, se debe realizar un análisis de alternativas. En este se puntuarán cada una de las alternativas planteadas anteriormente en función de una serie de parámetros que se consideran fundamentales para la viabilidad del proyecto.

9.1 Espacio requerido:

La superficie libre en las instalaciones de TECNICAFAE donde instalar el sistema de tratamiento es limitada. Es por eso que uno de los factores que se deben tener en cuenta a la hora de decidir que alternativa se adecua mejor al proyecto es el espacio que esta necesita para su implantación.

9.2 Coste de construcción:

Teniendo en cuenta que el proyecto en el que se engloba esta actuación tiene como uno de sus objetivos la formación de un diseño apto para la mayoría de explotaciones de beneficiado de café que se encuentran en la zona, es lógico que el factor económico es determinante a la hora de decidir que opción adaptar.

El coste de construcción de un sistema de tratamiento de aguas residuales debe tener en cuenta todas las estructuras auxiliares necesarias para el correcto funcionamiento, en este caso y debido a la localización geográfica en la que se emplaza el proyecto, es muy posible que el acceso a mano de obra cualificada para la construcción de alguno de estos elementos o incluso el material necesario

sean de difícil acceso, incrementando así notablemente los costes de algunas de las alternativas.

9.3 Coste de explotación:

A la hora de diseñar un tratamiento de aguas residuales no se debe tener en cuenta únicamente el coste inicial para su puesta en marcha, ya que en ocasiones los costes de operatividad pueden ser elevados, encareciendo o llegando a imposibilitar la implantación del mismo. El coste de explotación de las alternativas está directamente relacionado con las necesidades de mantenimiento que estas presentan, es por eso que en la fase de su planteamiento se han descartado algunas opciones que requerían mantenimiento muy especializado o materiales escasos en la zona.

9.4 Rendimiento:

Actualmente, en las instalaciones del parque no existe ningún sistema generalizado para el tratamiento de las aguas residuales que se producen en el beneficiado del café. Esto hace que cualquier pequeña acción que se lleve a cabo mejore la situación de vertido de aguas contaminadas al medio, no obstante en este caso se busca conseguir el mayor rendimiento posible, teniendo en cuenta los condicionantes geográficos, económicos y sociales en los que se engloba el proyecto.

El hecho de no aceptar alternativas que presentasen rendimientos bajos elimino la posibilidad habitual para otro tipo de proyectos en los que se plantea la alternativa 0 (no actuar) y únicamente implantar el prototipo REAGRITECH. Otro factor que ha imposibilitado el planteamiento de la alternativa 0 son las necesidades que presenta el prototipo en cuanto a concentración de contaminantes en la entrada del sistema.

9.5 Adaptabilidad:

Aunque actualmente nos encontremos en una fase experimental, la finalidad del proyecto es tratar el volumen total de aguas residuales generadas en la planta, llegando a poder tratar un volumen mayor incluso en el caso de que la planta aumentase su volumen de producción de café.

Es por eso que la adaptabilidad que presentan las alternativas expuestas frente a incrementos de carga o de volumen total de trabajo es un factor que debe tenerse en cuenta. En el caso de las alternativas que presentan estructuras rígidas esta adaptabilidad se ha visto limitada, encareciendo notablemente el coste que representaría adaptar dicha alternativa de la fase experimental a la fase de explotación.

9.6 Criterio de puntuación:

Para poder valorar las alternativas se ha planteado un sistema de puntuación, cada una de las alternativas recibirá una puntuación del 0 al 10 (0 pésimo, 10 excelente) en función de los parámetros presentados anteriormente.

A su vez estas puntuaciones se verán afectadas por un coeficiente que oscilara entre 0-1, este coeficiente pretende hacer énfasis en la importancia que se le da a cada uno de los parámetros presentados previamente.

La suma de las puntuaciones obtenidas para cada uno de estos parámetros será la nota de la alternativa.

La nota máxima (global) que pueden tener las alternativas es de 10 (optimo) y la mínima 0 (pésimo)

La alternativa con mayor puntuación es por lo tanto, la que se adoptara en el proyecto.

Formulación utilizada para la puntuación:

$$N = \frac{(C_e * N_e) + (C_{cc} * N_{cc}) + (C_{ce} * N_{ce}) + (C_r * N_r) + (C_a * N_a)}{5}$$

Dónde:

N: Nota global de la alternativa

Ce: Coeficiente de relevancia para el requerimiento de espacio (0.7).

Ne: Nota obtenida por la alternativa para el requerimiento de espacio.

Ccc: Coeficiente de relevancia para el coste de construcción (0.8).

Ncc: Nota obtenida por la alternativa para el coste de construcción.

Cce: Coeficiente de relevancia para el coste de explotación (0.8).

Nce: Nota obtenida por la alternativa para el coste de explotación.

Cr: Coeficiente de relevancia para el rendimiento (0.6).

Nr: Nota obtenida por la alternativa en función de su rendimiento.

Ca: Coeficiente de relevancia frente a la adaptabilidad de la alternativa (0.75).

Na: Nota obtenida por la alternativa en función de su adaptabilidad.

10. Puntuación de las alternativas

10.1 Alternativa 1: Filtración.

La alternativa 1 presentaba un sistema de tratamiento de aguas residuales mediante la utilización de filtros.

Espacio (Ne):

En lo referente al espacio requerido por esta opción se realizó un pre calculo en el que se dimensiono de forma aproximada la superficie que esta ocuparía, siendo de 2m².

Como se puede ver los requerimientos de espacio para esta opción son mínimos, por lo que se le da una Ne de 9 sobre 10.

Inversión inicial (Ncc):

La inversión necesaria para la construcción de los filtros puede variar según la disponibilidad del material granular utilizado, de todas formas y gracias a investigaciones que se están desarrollando en la planta, se ha visto que la borra de café se comporta como un buen medio filtrante. Gracias a la posibilidad de reutilizar residuos generados en el propio parque el coste disminuye. Teniendo en cuenta lo anterior se le ha dado una puntuación Ncc de 8 sobre 10.

Coste de explotación (Nce):

El mantenimiento de un sistema de filtros debe realizarse con cierta periodicidad, ya que en el caso de no hacerlo el rendimiento de los mismos disminuye notablemente. En este caso el mantenimiento se realiza de forma manual, y con una periodicidad de 1 a 2 meses. La puntuación que se le ha dado en lo relativo al coste de explotación (Nce) es de 8 sobre 10.

Rendimiento (Nr):

La eliminación de carga contaminante que se realiza mediante la utilización de filtros puede verse afectada por diversos condicionantes, estos pueden ser tanto producto de cambios de temperatura como por un mal mantenimiento. Son estas debilidades las que han determinado que la nota referente al rendimiento (Nr) para esta alternativa sea de 6 sobre 10.

Adaptabilidad (Na):

El dimensionamiento de un sistema de filtros se basa en la superficie del mismo para tratar la CHS de entrada, esto hace que una variación en este parámetro o en el volumen de agua a tratar sea difícil de absorber por el sistema. Es por eso que se le ha dado una nota de 6.5 sobre 10.

Nota global: (N):

Siguiendo la formulación planteada anteriormente:

$$N = \frac{(0.7 * 9) + (0.8 * 8) + (0.8 * 8) + (0.6 * 6) + (0.75 * 6.5)}{5} = 5.51$$

La puntuación obtenida por la Alternativa 1 (Filtración) es de **5.51 sobre 10**.

10.2 Alternativa 2: Tanque imhoff.

La segunda alternativa planteada es la que basa su funcionamiento en la instalación de un tanque imhoff.

Espacio (Ne):

En este caso, los requerimientos de espacio que presenta un tanque imhoff son considerables, debido a la necesidad de dar cabida a los fangos generados en el proceso, y a depender del tiempo de retención (TRH) del tanque.

Teniendo en cuenta esto, se llevó a cabo un pre dimensionamiento.

La nota obtenida en este parámetro (Ne) por la alternativa 2 es de 7 sobre 10.

Inversión inicial (Ncc):

Los costes que presenta la construcción de un tanque imhoff son elevados, debido a la complejidad de la estructura se debe disponer de mano de obra cualificada. Por otro lado la necesidad de un volumen de material mayor que en algunas alternativas, produce un incremento de coste frente a las demás.

La nota obtenida es de 6.5 sobre 10.

Coste de explotación (Nce):

Los costes de mantenimiento y explotación que presenta un tanque imhoff dependen de las características concretas del proyecto, en este caso se ha hecho una estimación en función de experiencias anteriores.

La nota obtenida para la alternativa 2 en lo referente a costes de explotación es de 7 sobre 10.

Rendimiento (Nr):

El rendimiento que presenta un tanque imhoff es superior que en el caso de un sistema de filtrado, pero de todas formas sigue siendo un rendimiento relativamente bajo teniendo en cuenta el coste de su implantación.

Es por eso que se ha puntuado con 6 sobre 10.

Adaptabilidad (Na):

Un tanque imhoff es una estructura rígida, con lo cual su dimensionamiento debe realizarse para unas condiciones de operatividad fijas, esto provoca que la adaptabilidad del sistema frente a variaciones de volumen de entrada no sea adecuada.

Teniendo en cuenta lo anterior se ha dado una puntuación de 6 sobre 10.

Nota global (N):

Siguiendo la formulación planteada anteriormente:

$$N = \frac{(0.7 * 7) + (0.8 * 6.5) + (0.8 * 7) + (0.6 * 7) + (0.75 * 6)}{5} = 4.88$$

La puntuación global obtenida por la Alternativa 2 (Tanque imhoff) es **de 4.88 sobre 10.**

10.3 Alternativa 3: Filtración + Tanque imhoff

En este caso, se buscaba reducir los requerimientos de espacio del tanque imhoff mediante la instalación de un sistema de filtrado previo, esto también da un rendimiento superior al conjunto.

Espacio (Ne):

Con la instalación de una etapa previa al tanque la necesidad de espacio aumenta, aunque los filtros no requieren de una superficie considerable, esto ha provocado que esta alternativa obtenga una puntuación ligeramente inferior en este aspecto

La puntuación obtenida es de 6 sobre 10.

Inversión inicial (Ncc):

Como es lógico, la inversión necesaria para la implantación de esta alternativa es superior que en el caso anterior, ya que se añade el coste de la construcción de los filtros. De todas formas, teniendo en cuenta el incremento que esto supone, se ha considerado que no hay una variación significativa entre los costes de construcción para las alternativas 2 y 3.

Por lo explicado anteriormente se le ha dado la misma puntuación que en el caso de la Alternativa 2, siendo esta de 6.5 sobre 10.

Coste de explotación (Nce):

El coste de explotación que presenta el sistema combinado entre filtros y tanque imhoff resulta inferior que en el caso de la alternativa 2, esto se da gracias a la disminución en la producción de fangos, aumentando así el tiempo entre vaciados.

De esta forma la puntuación para este aspecto es ligeramente superior que en el caso anterior, 7.5 sobre 10.

Rendimiento (Nr):

Como es previsible, el rendimiento de eliminación de contaminantes aumenta al añadir una etapa de filtración al sistema.

Este aumento se refleja en la nota obtenida por la Alternativa 3, siendo esta de 8 sobre 10.

Adaptabilidad (Na):

La piedra angular de esta alternativa es el tanque imhoff, igual que en la alternativa 2, es por eso que presenta la misma adaptabilidad que en el caso anterior y por lo tanto la nota obtenida es la misma, 6 sobre 10.

Nota global (N):

Siguiendo la formulación planteada anteriormente:

$$N = \frac{(0.7 * 6) + (0.8 * 6.5) + (0.8 * 7.5) + (0.6 * 8) + (0.75 * 6)}{5} = 4.94$$

La nota global obtenida por la Alternativa 3 es de **4.94 sobre 10**.

10.4 Alternativa 4: Biodigestor.

La alternativa 4 utiliza un biodigestor para tratar las aguas residuales, en este caso se trata de una mejora del tanque imhoff.

Espacio (Ne):

La necesidad de espacio que presenta esta alternativa es inferior que en el caso del tanque imhoff, pero claramente superior que en el caso de la alternativa 1.

Es por eso que se ha puntuado con 8 sobre 10.

Inversión inicial (Ncc):

Gracias a la gran variedad de biodigestores que se comercializan actualmente, se pueden encontrar modelos a precios realmente competitivos. El coste real

del biodigestor dependerá de la procedencia del mismo ya que el transporte puede encarecerlo notablemente.

Teniendo en cuenta lo anterior, se le ha dado una puntuación de 8 sobre 10.

Costes de explotación (Nce):

Gracias al reaprovechamiento de los gases generados en el interior del biodigestor, y a la posibilidad de utilizar los fangos como material de compostaje en las propias instalaciones, los costes de explotación del sistema se reducen notablemente.

La nota obtenida en este aspecto por la Alternativa 4 es de 8 sobre 10.

Rendimiento (Nr):

Los biodigestores presentan un rendimiento relativamente elevado, aunque como en el caso de los filtros, este se ve afectado por las condiciones ambientales.

La puntuación obtenida en este caso es de 7.5 sobre 10.

Adaptabilidad (Na):

Al tratarse de un elemento prefabricado, la adaptabilidad que este sistema presenta frente a cargas de trabajo superiores no es la que requiere el proyecto. Esto no quiere decir que se deba descartar esta opción, ya que el coste de un biodigestor de dimensiones mayores no es elevado, pudiendo cambiarlo en cualquier momento que se requiera.

La nota obtenida por la Alternativa 4 es de 6.5 sobre 10.

Nota Global (N):

Siguiendo la formulación planteada anteriormente:

$$N = \frac{(0.7 * 8) + (0.8 * 8) + (0.8 * 8) + (0.6 * 7.5) + (0.75 * 6.5)}{5} = 5.55$$

La nota global obtenida por la Alternativa 4 es de **5.55 sobre 10**.

10.5 Alternativa 5: Filtrado + Biodigestor.

De forma análoga al planteamiento de la alternativa 3, se ha pensado en la posibilidad de instalar un sistema de filtros previo al biodigestor.

Espacio (Ne):

En este caso, el requerimiento de espacio no aumenta de forma considerable frente a la opción anterior, es por eso que la nota dada para la alternativa 5 es la misma que en el caso de la alternativa 4, 8 sobre 10.

Inversión inicial (Ncc):

Debido al bajo coste que presenta la instalación de los filtros, no se produce un aumento significativo en la inversión inicial necesaria,

La nota en este caso es de 8 sobre 10, la misma que en la alternativa 4.

Coste de explotación (Nce):

Los costes de explotación para el caso que se plantea en la alternativa 5 son, gracias al reaprovechamiento de los residuos generados, prácticamente idénticos que en el caso anterior. Únicamente se debe sumar el gasto producido por los filtros.

De esta forma la nota obtenida por la alternativa 5 es de 8 sobre 10.

Rendimiento (Nr):

El rendimiento del sistema aumenta gracias a la instalación de los filtros, esto se da gracias a que el filtrado permite estabilizar el pH de entrada al biodigestor (parámetro que afecta considerablemente a su rendimiento).

La nota obtenida es de 9 sobre 10.

Adaptabilidad:

La adaptabilidad de este sistema frente a un incremento de volumen es ligeramente superior que en el caso anterior, ya que el filtro sirve de regulador de entrada al biodigestor.

Es por eso que se le ha dado una puntuación de 7.5 sobre 10.

Nota global (N):

Siguiendo la formulación planteada anteriormente:

$$N = \frac{(0.7 * 8) + (0.8 * 8) + (0.8 * 8) + (0.6 * 9) + (0.75 * 7.5)}{5} = 5.88$$

La nota global obtenida por la Alternativa 5 es de **5.88 sobre 10**.

10.6 Alternativa 6: MBR.

La posibilidad de adaptar un sistema MBR (birreactor de membranas) se ha planteado como alternativa 6, a continuación se puntuara la alternativa siguiendo el esquema anterior.

Espacio (Ne):

Los requerimientos de espacio necesario para el caso de un sistema MBR dependerán de la metodología aplicada, en cualquier caso se debe tener en cuenta que requiere de una superficie necesaria como para dar cabida a los elementos de control.

Teniendo en cuenta lo anterior, se ha dado una nota de 7 sobre 10.

Inversión inicial (Ncc):

El sistema MBR requiere de una instrumentación que normalmente supone una inversión inicial elevada. Por otro lado, si no se puede conseguir el sistema de membranas en la zona en la que se implanta, puede resultar una alternativa costosa.

La nota obtenida es de 6 sobre 10.

Coste de explotación (Nce):

La necesidad constante de aporte energético y el mantenimiento especializado que requiere este sistema producen unos costes de explotación realmente elevados si se comparan con las alternativas anteriores.

La nota obtenida es de 6 sobre 10.

Rendimiento (Nr):

En este caso, el rendimiento que puede llegar a presentar un sistema MBR es claramente superior que en las alternativas anteriores ya que gracias a la naturaleza de su sistema de funcionamiento, permite eliminar prácticamente la totalidad de MES y DBO que encontramos en el agua residual.

Es por eso que se ha puntuado con 9 sobre 10.

Adaptabilidad (Na):

En lo referente a la adaptabilidad que presentan los sistemas MBR frente a variaciones de caudal o de carga contaminante, se ha visto que es superior que en los casos anteriores.

Teniendo en cuenta esto se le ha dado un 8,5 sobre 9.

Nota global (N):

Siguiendo la formulación planteada anteriormente:

$$N = \frac{(0.7 * 7) + (0.8 * 6) + (0.8 * 6) + (0.6 * 9) + (0.75 * 8.5)}{5} = 5.25$$

La nota global obtenida por la Alternativa 6 es de **5.25 sobre 10**.

10.7 Alternativa 7: Floculación- decantación

En la alternativa 7 se presentaba la posibilidad de adaptar el esquema simplificado que siguen los tratamientos de aguas residuales convencionales en las EDAR.

Espacio (Ne):

En este caso, la necesidad de implantar tres estructuras en la línea de agua hace que los requerimientos de espacio se disparen.

Por eso la nota obtenida en este caso es claramente inferior que en las alternativas anteriores, siendo esta 5 sobre 10.

Inversión inicial (Ncc):

El coste de construcción de los elementos que conforman esta alternativa puede ser elevado si no se dispone de los recursos necesarios. Por otro lado la necesidad de sistemas auxiliares para el tratamiento de fangos, hacen de esta una alternativa cara.

La nota obtenida es de 6 sobre 10.

Costes de explotación (Nce):

Igual que en el caso del sistema MBR, esta alternativa presenta un requerimiento de aporte energético constante. En cuanto al mantenimiento se debe tener en cuenta el gasto económico que supone tratar los fangos producidos y los gastos derivados del aporte del coagulante necesario para el proceso.

Es por esto que el sistema resulta más costoso que las alternativas 1,4,5 y la nota obtenida es de 6.5 sobre 10.

Rendimiento (Nr):

El rendimiento de este tipo de sistemas suele ser elevado, aunque al realizar las simplificaciones para poder darle cabida en las instalaciones del parque es posible que no sea el habitual.

Teniendo en cuenta lo anterior se ha puntuado con 7.5 sobre 10.

Adaptabilidad (Na):

La adaptabilidad de este proceso frente a incrementos en el volumen de agua no es la requerida, ya que se tratan de estructuras rígidas y un incremento de volumen reduciría de forma directa el rendimiento global.

La nota obtenida es de 5.5 sobre 10.

Nota global (N):

Siguiendo la formulación planteada anteriormente:

$$N = \frac{(0.7 * 5) + (0.8 * 6) + (0.8 * 6.5) + (0.6 * 7.5) + (0.75 * 5.5)}{5} = 4.42$$

La nota global obtenida por la Alternativa 7 es de **4.42 sobre 10**.

10.8 Presentación de resultados:

Una vez puntuadas todas las alternativas, siguiendo los criterios establecidos para este proyecto, se presenta un cuadro resumen con las puntuaciones obtenidas por todas ellas.

De esta forma se puede analizar de una forma visual y sencilla de donde proviene la nota global de cada una de ellas.

Puntuación de alternativas						
Alternativa	Ne	Ncc	Nce	Nr	Na	N
1	9	8	7	6	6,5	5,35
2	7	6,5	6	7	6	4,72
3	6	6,5	6,5	8	6	4,78
4	8	8	8	7,5	6,5	5,55
5	8	8	8	9	7,5	5,88
6	7	6	6	9	8,5	5,25
7	5	6	6,5	7,5	5,5	4,42

Tabla 10 Puntuacion de alternativas

10.8.1 Elección de la alternativa:

Según lo expuesto anteriormente, y una vez analizadas todas las alternativas en función de los criterios fijados al inicio del análisis, se ha considerado que la Alternativa que se adapta de mejor forma al proyecto es la Alternativa 5: Filtro + Biodigestor.

En ella se encuentra un equilibrio entre rendimiento y rentabilidad que la hacen realmente competitiva frente al resto y la convierten en la alternativa con la mayor puntuación.

11 Diseño y dimensionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales

A continuación se presentara el dimensionamiento y diseño del sistema completo de tratamiento de aguas residuales producidas en el lavado del café. En este diseño se acoplaran la etapa 1 (tratamiento primario) y el sistema desarrollado en el proyecto LIFE+REAGRITECH. Para el diseño de la etapa 1, se ha realizado un análisis de alternativas, en el que, según unos condicionantes establecidos, se ha buscado la solución que mejor se adapta a las características del proyecto.

Debemos tener en cuenta que el proyecto LIFE+REAGRITECH se encuentra en una fase experimental, y que el sistema que se implantara en primera instancia es un prototipo. Esto hace que el dimensionamiento se haya dividido en dos bloques.

En el primer bloque se realizara el dimensionamiento y diseño necesario para la instalación y puesta en marcha del prototipo actual, esta línea de tratamiento tendrá una capacidad máxima de 150l/día, que representa un 5% del volumen total diario producido en época de cosecha.

Una vez entre en funcionamiento el sistema a escala, se podrán extraer conclusiones sobre la efectividad real del sistema, y por lo tanto realizar las modificaciones necesarias (si es que las hubiera) para la implantación del sistema a escala 1:1.

El segundo bloque consistirá en el dimensionamiento de la línea de tratamiento para las aguas residuales teniendo en cuenta el volumen total a tratar, por motivos de seguridad, en este caso se sobredimensionara, Este sobredimensionamiento se realiza por motivos de seguridad y economización de la instalación, aumentando la capacidad de la misma para poder hacer frente a un futuro crecimiento en el volumen de producción de la planta.

Cabe recordar que ambos dimensionamientos y líneas de tratado de aguas residuales se diseñan para las producidas en el lavado del café, ya que actualmente no se tiene la certeza de que el sistema pueda hacer frente a la carga contaminante de las aguasmieles.

Por otro lado, en el caso del dimensionamiento a escala real se debe tener en cuenta que este podrá sufrir modificaciones. Estas modificaciones se deberán realizar una vez se obtengan datos sobre el funcionamiento real del prototipo, ya que es posible que existan variaciones en cuanto a rendimientos teóricos y los que se dan en la planta.

11.1 Diseño y dimensionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales en fase de prototipo.

En este primer apartado, como se ha comentado anteriormente se realizara el dimensionamiento y acople del sistema de tratamiento de aguas residuales teniendo en cuenta la capacidad del sistema LIFE+REAGRITECH.

Actualmente, la capacidad de tratamiento que presenta el sistema REAGRITECH es de 150l/día, esto representa un 5% del volumen de agua residual generado en la planta.

Debido a que todo el sistema basa su funcionamiento en procesos biológicos, el correcto dimensionamiento del mismo es clave, ya que del funcionamiento de este sistema se extraerán las conclusiones necesarias para realizar el escalado a tamaño real posterior.

El tratamiento primario que se va a dimensionar consta de dos elementos, un sistema de filtrado y un biodigestor. Esta alternativa ha sido la que mayor puntuación ha obtenido en el análisis multi-criterio, y con lo cual es la que mejor se adapta a las condiciones del proyecto.

Al componerse de diversas etapas, se debe realizar el dimensionamiento de las mismas siguiendo el orden en el que se emplazaran, pudiendo afinar las dimensiones en función de la carga que deban soportar cada una de ellas.

Teniendo en cuenta lo anterior, previo al dimensionamiento se debe realizar la caracterización de las aguas residuales a tratar, gracias a los registros realizados en el parque se conocen los siguientes parámetros:

Aguas del lavado de café		
Parametro		
DBO5	12124	mg/l
DQO	25102	mg/l
SST	1133	mg/l
pH	3,34	
Temperatura	18-20	°c

Tabla 11 Parámetros Básicos del agua residual del lavado del café

Una vez conocidos los parámetros básicos, se procede con el dimensionamiento del sistema.

El dimensionamiento se realizara en dos partes, en la primera se dimensionara el sistema de filtrado, y se estimaran las necesidades de mantenimiento del mismo. A continuación se fijaran las características que debe tener el biodigestor y el sistema de unión con el prototipo LIFE+REAGRITECH.

11.1.1 Dimensionamiento del sistema de filtrado:

La primera fase del tratamiento consiste en dos filtros, formados por diversos materiales granulares.

Actualmente, en la planta se encuentran unos filtros compuestos por borra de café y arena, que tratan las aguasmieles.

Viendo que los filtros compuestos en parte por borra de café dan resultado en la eliminación de contaminantes en el agua, se adaptara este mismo sistema para el filtrado de las aguas residuales del lavado del café.

En este caso, se ha optado por un filtro en el que el 70% será borra de café y un 30% será arena. De esta forma, se reaprovechara parte de los residuos generados durante el beneficiado del café, reduciendo así el coste económico que supone el transporte de los residuos y su posterior tratamiento.

Para el dimensionamiento del filtro se han fijado los siguientes parámetros:

Caudal de entrada 200l/día, se ha optado por dotar al sistema de una capacidad ligeramente superior que la que presenta el prototipo REAGRITECH garantizando así un factor de seguridad.

Teniendo en cuenta que se trata de un filtro lento, la carga hidráulica superficial (CHS) se ha fijado en 5m/d.

Para la simplificación del cálculo, se ha fijado un único diámetro de partícula. Aunque el filtro este compuesto por dos materiales de naturaleza distinta, al dimensionarse para el de mayor diámetro, el dimensionamiento resulta conservador.

Para el dimensionamiento del filtro se han realizado una serie de simplificaciones, con estas se ha buscado simplificar el proceso de cálculo. Todas las simplificaciones se han hecho de forma conservadora, buscando así un sobredimensionamiento del sistema, garantizando así la capacidad del mismo para el tratamiento del volumen de agua de entrada.

Se ha aumentado el caudal de entrada a 200l/día, dotando al sistema de un 33% más de capacidad que la que tiene el prototipo REAGRITECH.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede conocer la superficie del filtro.

$$CHS = \frac{Q}{S}$$

Dónde:

CHS: Carga hidráulica superficial (m/d)

Q: Caudal (m³/d)

S: Superficie (m²)

$$5 \text{ m/d} = \frac{0,2 \text{ m}^3/\text{d}}{S \text{ m}^2}$$

$$S = 0.04 \text{ m}^2$$

En este caso, se ha optado por un filtro con una sección circular.

Con lo cual el diámetro necesario para el contenedor del material granular se deduce de la siguiente expresión:

$$S = \pi r^2$$

$$0.04 = \pi r^2$$

$$r = 0.112\text{m} \approx 0.15\text{m}$$

Una vez conocida el área y el radio que deberá tener el contenedor, se procede estableciendo la profundidad del lecho.

Tal y como se expuso en el planteamiento de la alternativa, existen dos tipologías de filtros, en este caso se ha optado por un filtro lento. En este caso, y teniendo en cuenta el funcionamiento del mismo, sabemos que el proceso en el que se eliminan los contaminantes del agua se produce en los primeros 10cm del lecho, de todos modos por motivos de seguridad y para permitir que la vida útil del filtro aumente, se establece una profundidad de 0.75m.

Con esto se garantizara el poder limpiar el filtro durante 6 ciclos, en los cuales se retirara la capa donde se genera la biopelícula.

En cuanto a la granulometría del filtro, se ha idealizado un filtro con una granulometría que cumple los siguientes parámetros, estos parámetros se han extraído de

$$d_{10} = 0.5\text{mm}$$

$$d_{60} = 1\text{mm}$$

$$C_u = 2$$

Dónde:

D10: Tamaño de partícula que corresponde a $P=10\%$ de la curva granulométrica, de modo que el 10% de las partículas son más finas que d_{10} .

D60: Tamaño de partícula que corresponde a $P=60\%$ de la curva granulométrica, de modo que el 60% de las partículas son más finas que d_{60} .

Cu: Coeficiente de uniformidad.

En lo que al filtro respecta, contara con un resguardo de 25cm en la parte superior y un doble fondo a 5cm por debajo de la capa de lecho filtrante por donde se evacuara el agua filtrada.

Teniendo en cuenta lo anterior, el filtro tendrá la siguiente forma:

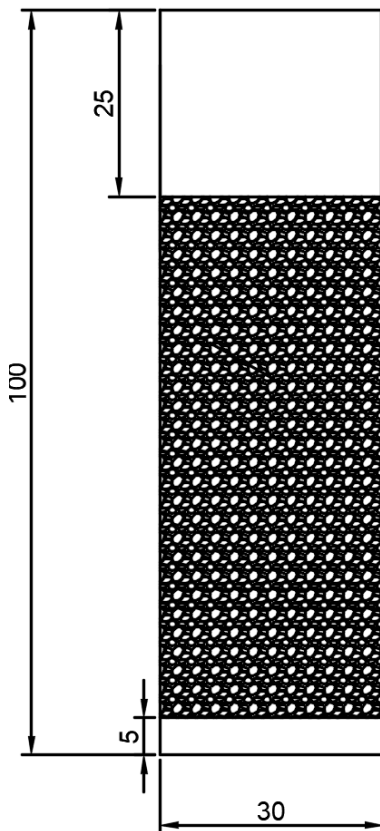


Imagen 27 Filtro (unidades en cm)

Para garantizar la continuidad del tratamiento de las aguas residuales a lo largo del tiempo, se recomienda tener un filtro de reserva, así se podrá instalar este en el momento de realizar el lavado. Garantizando así un flujo prácticamente constante en el tiempo.

Una vez establecidas las dimensiones del filtro se debe comprobar que la diferencia de presiones entre la entrada y la salida del sistema no influye de forma notable en la velocidad del agua por el sistema de conducciones.

Para el cálculo de la diferencia de presiones se ha seguido la formulación de Kozeny-Carman, se debe tener en cuenta que dicha formulación hace referencia a medios limpios y por lo tanto se debe prever una pérdida de carga en el filtro. Esta ecuación únicamente funciona en régimen laminar, por lo que será necesario comprobar si realmente nos encontramos en él.

Comprobación de régimen hidráulico

La comprobación del régimen en el que se encuentra el agua se realiza comparando el número de Reynolds con unos valores límite del mismo que establecen si nos encontramos en régimen laminar o turbulento.

El número de Reynolds se calcula según la siguiente expresión:

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu}$$

Dónde:

Re: Es el número de Reynolds, en el caso que sea inferior a 2000 nos encontraremos en régimen laminar, por el contrario si es superior a 4000 será régimen turbulento.

ρ : Densidad del agua 998,1 Kg/m³.

v : velocidad del agua (5m/día).

μ : Viscosidad del agua 1 m Pa s.

D : diámetro (0,3m)

En el caso que nos ocupa $Re < 2000$ con lo cual se trata de régimen laminar, permitiéndonos así aplicar la formulación de Kozeny-Carman:

Formulación:

$$\frac{\Delta p}{L} = - \frac{180\mu}{(\phi d)^2} * \frac{(1 - e)^2}{e^3} * v_s$$

Dónde:

Δp : Diferencia de presiones (Pa)

L : Altura del filtro (m)

μ : Viscosidad del agua (1m*Pa*s)

ρ : Densidad del agua (1g/cm³)

V_s : Velocidad del agua (CHS en m/d)

ϕ : coeficiente de esfericidad

d: diámetro de las partículas (mm)

g: gravedad (9,81 m/s²)

e: porosidad del filtro

Teniendo en cuenta la formulación anterior, se han realizado una serie de simplificaciones.

La porosidad del filtro se ha considerado constante a lo largo del mismo, idealizando su granulometría como un material homogéneo, se ha tomado el valor de la porosidad de una arena bien graduada 0.35.

El diámetro de las partículas, siguiendo la simplificación realizada en la porosidad, se ha considerado uniforme a lo largo del filtro, fijándolo en 0.5mm.

De esta forma, para el caso que nos ocupa, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\frac{\Delta_p}{0.75} = - \frac{180 * 0.001}{(0.75 * 0.3/1000)^2} * \frac{(1 - 0.35)^2}{0.35^3} * \frac{5}{24 * 3600}$$

$$\Delta_p = 2.5 \text{ Pa}$$

En este caso se observa que la diferencia de presiones es prácticamente despreciable, con lo cual se acepta el dimensionamiento del filtro.

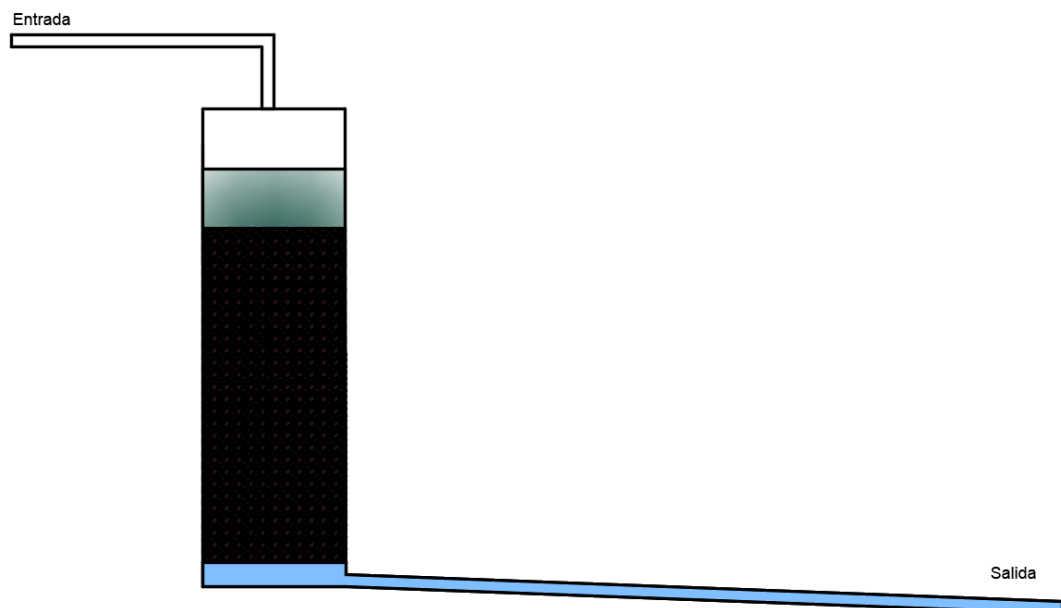


Imagen 28 Esquema de funcionamiento del filtro

El deposito será prefabricado, de PVC y se rellenara con una mezcla compuesta por 70% borra de café proveniente de las instalaciones del parque y un 30% de arena.

Recomendaciones para su mantenimiento:

Su mantenimiento se realizara de forma periódica, en principio con una frecuencia de dos semanas, aunque esta puede modificarse en función del rendimiento que este mostrando el sistema.

Se debe garantizar que en todo momento la temperatura a la que se encuentra el filtro este en torno a 20°C.

Para su limpieza se desconectara del sistema, y se reemplazara por un filtro de sustitución. Permitiendo así la limpieza del filtro en seco y no paralizando el proceso de lavado de aguas.



Imagen 29 Contenedor del material filtrante

11.1.2 Dimensionamiento y definición del Biodigestor:

El segundo elemento del que se compone este diseño es un biodigestor. Es gracias a este donde el sistema aumenta su rendimiento en lo que a eliminación de DBO se refiere.

En este caso, el biodigestor es un elemento prefabricado, por lo tanto únicamente se debe calcular el volumen que debe tener este.

Existe una gran variedad de biodigestores en el mercado actual, de entre ellos se ha optado por la marca ROTOPLAS, ya que esta tiene sede en Colombia y esto simplificaría notablemente las gestiones logísticas de transporte necesarias hasta las instalaciones de TECNICA FE



Imagen 30 Biodigestor comercial Rotoplas (600l)

Los biodigestores comerciales se caracterizan en función de su capacidad, siendo su volumen el volumen de agua que son capaces de tratar diariamente.

Teniendo en cuenta el reducido volumen de agua que se tratara en esta etapa, se ha escogido el más pequeño de los que encontramos en el mercado

El modelo escogido para esta fase del proyecto será el siguiente (con capacidad de 600 l):

La ficha técnica se adjunta en el anexo N°1 Fichas técnicas.

11.1.3 Dimensionamiento de las conducciones de entrada y salida:

A continuación se realizara el diseño y definición de las características que deben tener las conducciones de entrada al filtro y de salida del mismo, la conducción de salida del filtro será a su vez la que conectara con la entrada del biodigestor.

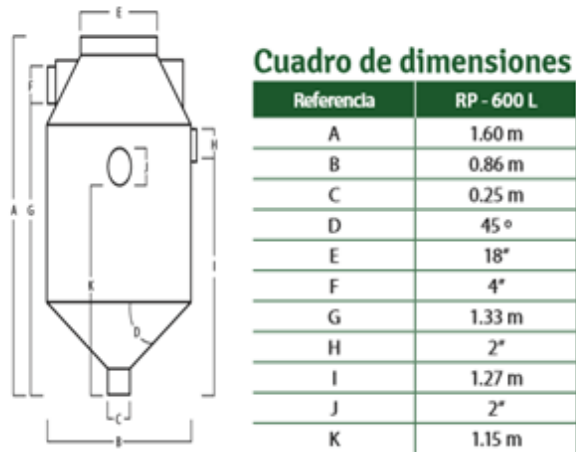


Tabla 12 Dimensiones Biodigestor Rotoplas (600l)

En toda conducción hidráulica deben realizarse una serie de comprobaciones, para garantizar un flujo mínimo de agua en la misma. En el caso de las conducciones, si se sobredimensionasen demasiado, se correría el riesgo de reducir en exceso la velocidad del fluido en su interior y esto puede producir problemas de sedimentación.

La comprobación de la conducción se ha realizado mediante la formulación de Manning:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

Siendo:

V: la velocidad media del fluido (m/s)

n: el coeficiente de Manning, referente a la rugosidad del material.

Rh: Radio Hidráulico (m).

S: pendiente en tanto por uno de la conducción.

En este caso, al no poder garantizar que la conducción trabajara a sección completa se debe calcular el radio hidráulico para el volumen de agua que transportara.

Como se ha explicado con anterioridad, un flujo de agua con velocidad insuficiente generara problemas de sedimentación en la conducción. Por eso se ha fijado una velocidad mínima del agua de 0.4m/s (aunque se recomienda que no sea inferior a 0,5m/s).

El diámetro de la tubería será de 1.3 cm, y el material de la misma será PVC flexible ya que presenta un coste muy bajo y una resistencia adecuada para el caso en el que nos encontramos, el coeficiente de Manning para el PVC es de 0.011



Imagen 31 Tubería PVC flexible

Las características son:

Ø INT I.D. mm	Ø EXT O.D. mm	PESO WEIGHT POIDS g/m	VACÍO VACUUM VIDE mm Ø	PRESIÓN SERVICIO WORKING PRESSURE PRESSION SERVICE bar	PRESIÓN ROTURA BURSTING PRESSURE PRESSION ÉCLAT bar	RADIO CURVATURA BENDING RADIUS RAYON DE COURBURE mm	LARGO ROLLO ROLL LENGTH LONG COURONE m
13	16	92	7	7	22,0	39	25-50

Tabla 13 Dimensiones tubería PVC flexible

Parámetros de la conducción		
Caudal	0,0024	l/s
Diámetro de la tubería	1.3	cm
Rugosidad (Manning)	0,011	
Pendiente	30%	
% de llenado	12,50%	
Velocidad	0,4	m/s
Rh	0,78	mm

Tabla 14 Características de la conducción (Prototipo)

Para garantizar que la conducción cumple, se forzara una pendiente del 30%, en este caso al tratarse de un sistema de dimensiones reducidas resulta sencillo situarlo en altura, generando así la pendiente requerida entre los puntos de entrada y salida. (CALC)

El emplazamiento exacto de los elementos que conforman este sistema requiere de un estudio de la zona, permitiendo conocer de forma exacta los espacios disponibles y la distribución de los mismos.

De igual forma, en el caso de que se requiriese la instalación de una bomba impulsora para aumentar la altura del agua o su velocidad, esta deberá definirse in-situ debido a la falta de datos de los que se dispone actualmente.

11.2 Dimensionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales a capacidad completa.

Como se ha explicado a lo largo de este proyecto, se trata de la implementación de un prototipo. Independientemente de la escala a la que trabajara el prototipo dimensionado en el apartado anterior, se ha realizado el dimensionamiento del sistema para dar servicio a la planta con el volumen de aguas residuales que se generan actualmente.

Es necesario recordar que únicamente se están tratando las aguas residuales producidas en el lavado del café, excluyendo así las aguasmieles producidas en la etapa de fermentación. Esto tiene como consecuencia que en la planta se producirán dos vertidos distintos de aguas, con cargas contaminantes claramente diferenciadas.

Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de realizar y estudiar este dimensionamiento es que se trata de la ampliación a escala real de la fase prototipo. Con esto se quiere aclarar que antes de realizar la construcción del sistema a tamaño real en base a los cálculos que encontramos en este proyecto, se debe realizar una comparación entre los rendimientos proporcionados por el prototipo y ajustarlos a los que se quieren obtener a tamaño real.

Debido al pequeño volumen de agua con el que es capaz de trabajar el prototipo, existen alteraciones en los procesos físicos (dinámica de fluidos) y biológicos (factores de escala), que pueden modificar el comportamiento del sistema. Es por eso que resulta muy recomendable realizar el estudio de cómo se comporta el prototipo, durante un periodo de tiempo representativo y realizar los ajustes que se consideren necesarios para la adaptación.

De la misma forma que se ha realizado para la fase del diseño prototipo, se desarrollara la Alternativa 5 (Filtros + Biodigestor). Y siguiendo el esquema utilizado en el dimensionamiento anterior:

Caracterización del agua, volúmenes y cargas:

En este caso, las aguas residuales de entrada no sufren variaciones en cuanto a los parámetros utilizados para su caracterización físico-química. Si se ve modificado el volumen de agua a tratar.

Según los registros de los que se disponen, en el Parque TECNICAFE, se producen hasta 7000l/día de aguas residuales provenientes del lavado del café en época de cosecha. También se observó un aumento de dicho volumen, llegando a los 8000l/día, es por eso que en el desarrollo de este proyecto, y previendo un posible aumento en la producción futura del parque el sistema se diseñara para un volumen de hasta **10000l/día**.

En cuanto a los parámetros característicos de las aguas residuales se conocen los siguientes datos:

Aguas del lavado de café		
Parametro		
DBO5	12124	mg/l
DQO	25102	mg/l
SST	1133	mg/l
pH	3,34	
Temperatura	18-20	°C

Tabla 15 Características de as aguas residuales del lavado del café

11.2.1 Dimensionamiento del sistema de filtrado:

Siguiendo lo establecido, el sistema de filtrado será la primera de las etapas de las que constara el tratamiento de las aguas residuales.

En este caso, el material filtrante a utilizar es el mismo que en el caso anterior, siendo 70% borra de café y 30% arena. Como se ha expuesto anteriormente, todos los parámetros fijados en este diseño son susceptibles de modificación, debido a que su rendimiento puede no ser el esperado durante la fase prototipo.

El volumen de agua a tratar, como se ha visto anteriormente será de 10000l/día, dotando así de capacidad suficiente al sistema como para hacer frente a picos en la generación de aguas residuales.

La carga superficial fijada para este filtro será de **5m/día**.

En cuanto a la granulometría del material filtrante, se ha simplificado idealizándola como un material uniforme, cuyo d10 es de 0.3mm. De esta forma, el filtro podría contener únicamente arena, en el caso de que se produjese escasez de borra en la planta.

La superficie necesaria para el filtro se calcula en base a la siguiente expresión:

$$CHS = \frac{Q}{S}$$

Dónde:

Q: Caudal de entrada, en este caso 10m3/día

CHS: Carga hidráulica superficial, en este caso 5m/día

Para el caso que nos ocupa, la superficie necesaria es de:

$$S = \frac{10 \text{ m}^3/\text{día}}{5 \text{ m}/\text{día}}$$

$$S = 2 \text{ m}^2$$

A continuación deben realizarse las mismas comprobaciones que se llevaron a cabo en el dimensionamiento del sistema de filtrado para el prototipo.

Comprobación del régimen hidráulico mediante la formulación de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu}$$

Dónde:

Re: Es el número de Reynolds, en el caso que sea inferior a 2000 nos encontraremos en régimen laminar, por el contrario si es superior a 4000 será régimen turbulento.

ρ : Densidad del agua 998,1 Kg/m³.

v : velocidad del agua (5m/día).

μ : Viscosidad del agua 1 m Pa s.

D: diámetro (1.6m)

En el caso que nos ocupa $Re < 2000$ con lo cual se trata de régimen laminar, permitiéndonos así aplicar la formulación de Kozeny-Carman:

$$\frac{\Delta p}{L} = - \frac{180\mu}{(\phi d)^2} * \frac{(1 - e)^2}{e^3} * v_s$$

Dónde:

Δp : Diferencia de presiones (Pa)

L: Altura del filtro (m)

μ : Viscosidad del agua (1m*Pa*s)

ρ : Densidad del agua (1g/cm³)

V_s : Velocidad del agua (CHS en m/d)

ϕ : coeficiente de esfericidad

d: diámetro de las partículas (mm)

g: gravedad (9,81 m/s²)

e: porosidad del filtro

Teniendo en cuenta la formulación anterior, se han realizado una serie de simplificaciones.

La porosidad del filtro se ha considerado constante a lo largo del mismo, idealizando su granulometría como un material homogéneo, se ha tomado el valor de la porosidad de una arena bien graduada 0.35.

El diámetro de las partículas, siguiendo la simplificación realizada en la porosidad, se ha considerado uniforme a lo largo del filtro, fijándolo en 0.5mm.

De esta forma, para el caso que nos ocupa, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\frac{\Delta_p}{0.75} = - \frac{180 * 0.001}{(0.75 * 0.3/1000)^2} * \frac{(1 - 0.35)^2}{0.35^3} * \frac{5}{24 * 3600}$$
$$\Delta_p = 2.5 \text{ Pa}$$

En este caso se observa que la diferencia de presiones es prácticamente despreciable, como sucedía en el caso anterior con lo cual se acepta el dimensionamiento del filtro.

Como se puede ver el resultado es el mismo, ya que no se han variado las propiedades del material filtrante ni las dimensiones en profundidad del filtro.

De todos modos, se debe recordar que se trata de un dimensionamiento “teórico” y que deberá realizarse un replanteo del mismo en función de los resultados obtenidos por el prototipo. Pudiéndose realizar modificaciones sustanciales en el caso de que fuera necesario.

Esquema del filtro

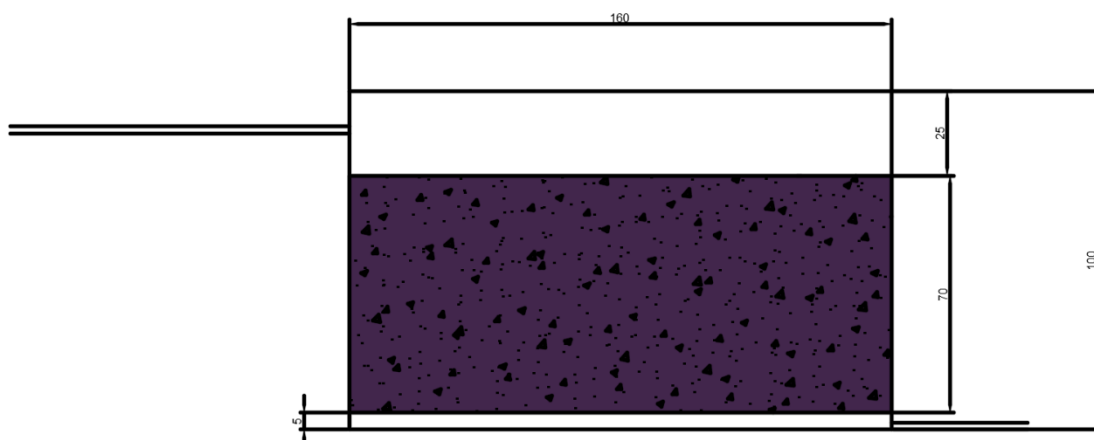


Imagen 32 Dimensionamiento del filtro (unidades en cm)

En este caso, se mantienen las dimensiones del resguardo y del doble fondo de desagüe. La diferencia con el filtro prototipo se encuentra en el área que este ocupa, en este caso el filtro contara con un diámetro de 160cm.

Los requerimientos de mantenimiento son iguales que en el caso del prototipo, ya que los procesos biológicos siguen la misma dinámica.

11.2.2 Dimensionamiento de las conducciones:

En este apartado se dimensionaran y definirán las características de las conducciones del sistema.

Estas conducciones son todas aquellas necesarias para el transporte del agua hasta el sistema de filtrado, y las que conectaran el sistema de filtrado con el biodigestor.

La velocidad mínima que debe tener el agua en la conducción se ha establecido en 0.5m/s, de esta forma se garantizara que no sedimentaran las partículas en suspensión que puedan existir en el agua.

Para la comprobación se ha utilizado la misma formulación que en el caso anterior:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

Siendo:

V: la velocidad media del fluido (m/s)

n: el coeficiente de Manning, referente a la rugosidad del material.

Rh: Radio Hidráulico (m).

S: pendiente en tanto por uno de la conducción.

En esta ocasión, al disponer de un volumen de agua superior, se han realizado los cálculos ideando que la conducción trabaja a sección completa.

Las características de la conducción son:

Parámetros de la conducción		
Caudal	0,187	l/s
Diámetro de la tubería	2	cm
Rugosidad (Manning)	0,011	
Pendiente	5%	
% de llenado	100%	
Velocidad	0,6	m/s
Rh	5	mm

Tabla 16 Parámetros de la conducción

En este caso, como se puede ver, la pendiente de la conducción se ha podido reducir de forma notable, evitando así la necesidad de instalar alguno de los elementos en altura o la instalación de sistemas de bombeo, que encarecerían el coste de construcción y explotación.

En este caso, todas las tuberías necesarias para el sistema serán de PVC flexible igual que en el caso anterior.

La unión entre tramos será encolada y se envolverán las juntas con cinta adhesiva plástica para garantizar así la estanqueidad del conjunto.

Las características de la tubería en cuanto a dimensiones son:

Ø INT I.D. Ø INT mm	Ø EXT O.D. Ø EXT mm	PESO WEIGHT POIDS g/m	VACÍO VACUUM VIDE mm Ø	PRESIÓN SERVICIO WORKING PRESSURE PRESSION SERVICE bar	PRESIÓN ROTURA BURSTING PRESSURE PRESSION ÉCLAT bar	RADIO CURVATURA BENDING RADIUS RAYON DE COURBURE mm	LARGO ROLLO ROLL LENGTH LONG COURBURE m
13	16	92	7	7	22,0	39	25-50
16	20	155	7	7	22,0	48	25-50
20	25	240	7	7	22,0	60	25-50

Tabla 17 Especificaciones de la conducción

Para garantizar una buena unión, y por facilidad durante el proceso de construcción se recomienda no cambiar el material de las conducciones.

Los cálculos hidráulicos se han realizado utilizando la misma herramienta que en el caso de la etapa anterior. CALC

11.2.3 Dimensionamiento y definición del Biodigestor.

El último de los elementos que conforman este sistema es el Biodigestor. En este caso, igual que sucedía en el caso anterior, es en el biodigestor donde se aumentara la efectividad global en cuanto a eliminación de DBO5.

En este caso, la marca ROTOPLAS que ha sido la escogida para suministrar el biodigestor de la fase anterior, no comercializa biodigestores de capacidad superior a 7000l, con lo cual se ha decidido que el de 7000l será el que se instale en el sistema.



Imagen 33 Biodigestor Rotoplas (7000L)

Las características geométricas del Biodigestor son:

Cuadro de dimensiones

Referencia	RP - 7 000 L
A	2.60 m
B	2.40 m
C	0.25 m
D	45 °
E	18"
F	4"
G	2.38 m
H	2"
I	2.27 m
J	2"
K	1.87 m

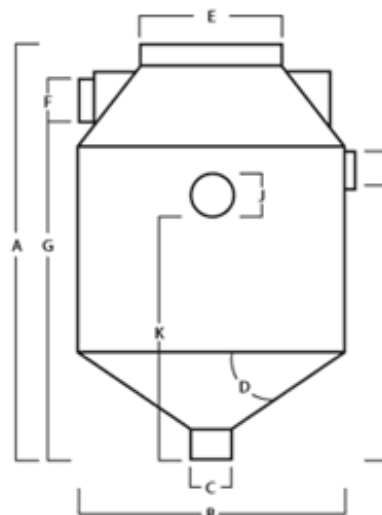


Imagen 34 Dimensiones del Biodigestor Rotoplas (7000L)

Toda la información referente a necesidades de mantenimiento e instalación se encuentran en el anejo N°1 Fichas técnicas y manuales

De forma análoga a lo que ocurre en el caso del dimensionamiento de la fase prototipo, en este caso se deberá realizar un estudio de los espacios disponibles, y a partir de este un replanteo para definir de forma exacta el emplazamiento de los elementos definidos en el dimensionamiento.

Además, al tratarse de la fase de tratamiento del volumen total de las aguas residuales generadas en el lavado del café, todos los elementos definidos anteriormente son susceptibles de sufrir modificaciones. Esto se debe a la posibilidad de que el sistema planteado originalmente no demuestre la eficiencia suficiente, o durante su funcionamiento se manifiesten problemas de operatividad.

Conclusiones:

Los objetivos planteados en el inicio de este proyecto se han cumplido en su totalidad.

Del análisis de alternativas se extrae la conclusión de que el mejor sistema para tratar las aguas residuales es, en este caso, la Alternativa 5, que es una combinación de un filtro y un biodigestor. Ambos elementos se plantearon de forma separada como alternativas independientes, pero después de su valoración se demostró que no presentaban el rendimiento suficiente.

En base a la alternativa 5 que obtuvo la mayor puntuación se ha realizado un diseño y dimensionamiento de los elementos que conforman el sistema primario, así como la conexión entre esta etapa y el prototipo LIFE REAGRITECH. Los elementos fundamentales son: Filtro de 200l, tubería de PVC flexible Øint 13mm, biodigestor Rotoplas 600l.

De la misma forma que en el caso anterior, se ha realizado un dimensionamiento y diseño para los elementos que conformaran el sistema primario para la planta de tratamiento a tamaño real. Los elementos fundamentales son: Filtro de 10000l, tubería de PVC flexible Øint 20mm, biodigestor Rotoplas 7000l.

Biografía

Andres.D.(2011). Universidad de cuenca. Filtros biológicos para la potabilización del agua, posibilidades de uso de FLA (Filtros Lentos de Arena) con agua superficial de nuestra región.

AQUARISC. Requerimientos en sitio para la adaptación del sistema de tratamiento REAGRITTECH-AQUARISC.

Calix, E.O.C. (2001). Evaluación de los sistemas tradicional y ecológico de beneficio húmedo de café. From http://teca.fao.org/sites/default/files/technology_files/T1289.pdf

CENICAFE. (2011a). Beneficio del café 1: Despulpado, Remoción del mucilago y Lavado.

CENICAFE. (2011b). Controle los flujos de café y agua en el módulo BECOLSUB. From <http://www.cenicafe.org/es/publications/avt0405.pdf>

CENICAFE. (2016). Cultivemos Café, Beneficio From http://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/beneficio

CYPE Colombia Banco de precios y PPT

IDEAM. CLIMATOLOGÍA TRIMESTRAL DE COLOMBIA Arango; C.; Dorado, J; Guzmán D.; Ruiz, J. F. Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático Subdirección de Meteorología – IDEAM

IDEAM. (2007^a). Demanda bioquímica de oxígeno 5 días, incubación y electrometría.

IDEAM. (2007^b). Demanda química de oxígeno por reflujo cerrado y volumetría.

IDEAM. (2007^c). Determinación de sólidos suspendidos totales en agua secados. From

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Sólidos+Suspendidos+Totales+en+aguas.pdf/f02b4c7f-5b8b-4b0a-1958aac1179c>.

Olaya.Y. (2009). Palmira. Fundamentos para el diseño de biodigestores.

Lopetegui.J.(2004). Criterios técnico-económicos para la implantación de la tecnología de bioreactores de membrana

N.Gutierrez (2014). Eficiencia de remoción de DBO5 y SS en sedimentador y lecho filtrante para el tratamiento de aguas residuales del beneficio de café. Artículo de investigación. (En línea) Colombia Forestal Vol. 17(2) Julio-Diciembre,2014.).

RAS (2000). REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO RAS - 2000 from www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_e_.pdf

SUPRACAFÉ.(2019) Nosotros – SUPRACAFÉ from <http://www.supracafe.com/nosotros/>

UNAM. (2019). UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN TRATAMIENTO DE AGUAS MANUAL DE LABORATORIO. From http://asesorias.cuautitlan2.unam.mx/fondo_editorial/comite_editorial/manuales/tratamiento_de_aguas_manualprac.pdf

Zamorana.M (2004). Universidad de Granada. Depuración de aguas con filtros inundados utilización de nuevos materiales.

CALC herramienta de cálculo online para flujos hidráulicos <http://www.hawsedc.com/engcalcs/Manning-Pipe-Flow.php?lang=es>

